



TUGAS AKHIR - MN 141581

**ANALISA PENJALARAN RETAK SEKAT RUANG MUAT
KAPAL TANKER 17500 DWT AKIBAT BEBAN MUATAN
DENGAN METODE ELEMEN HINGGA**

**Erlangga Fandra Zandi
NRP 4112100056**

**Dosen Pembimbing
Mohammad Nurul Misbah, S.T., M.T.
Totok Yulianto, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**



TUGAS AKHIR - MN 141581

**ANALISA PENJALARAN RETAK SEKAT RUANG MUAT
KAPAL TANKER 17500 DWT AKIBAT BEBAN MUATAN
DENGAN METODE ELEMEN HINGGA**

**Erlangga Fandra Zandi
NRP 4112100056**

**Dosen Pembimbing
Mohammad Nurul Misbah, S.T., M.T.
Totok Yulianto, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**



FINAL PROJECT - MN 141581

**CRACK PROPAGATION ANALYSIS OF CARGO BULKHEAD
OF TANKER 17500 DWT DUE TO TANK LOADS USING
FINITE ELEMENT METHOD**

**Erlangga Fandra Zandi
NRP 4112100056**

**Supervisor(s)
Mohammad Nurul Misbah, S.T., M.T.
Totok Yulianto, S.T., M.T.**

**DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE & SHIPBUILDING ENGINEERING
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2018**

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA PENJALARAN RETAK SEKAT RUANG MUAT KAPAL TANKER 17500 DWT AKIBAT BEBAN MUATAN DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Bidang Keahlian Rekayasa Perkapalan – Konstruksi
Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ERLANGGA FANDRA ZANDI
NRP 4112100056

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

Dosen Pembimbing II



Totok Yulianto, S.T., M.T.
NIP 19700731 199512 1 001

Dosen Pembimbing I



Mohammad Nurul Misbah, S.T., M.T.
NIP 19730404 199702 1 001

Mengetahui,
Kepala Departemen Teknik Perkapalan



Ir. Wasis Dwi Arsyawan, M.Sc., Ph.D.
NIP 19640210 198903 1 001

SURABAYA, 17 JULI 2018

LEMBAR REVISI

ANALISA PENJALARAN RETAK SEKAT RUANG MUAT KAPAL TANKER 17500 DWT AKIBAT BEBAN MUATAN DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

TUGAS AKHIR

Telah direvisi sesuai dengan hasil Ujian Tugas Akhir
Tanggal 17 Juli 2016

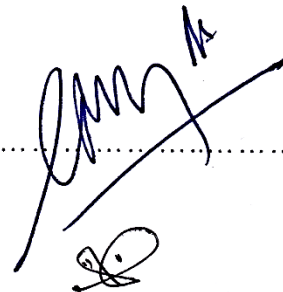
Bidang Keahlian Rekayasa Perkapalan – Hidrodinamika
Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Erlangga Fandra Zandi
NRP 4112100056

Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tugas Akhir:

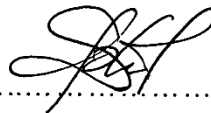
1. Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng, P.hD



2. Hasanudin, S.T., M.T.



3. Septia Hardy Sujiatanti, S.T., M.T.

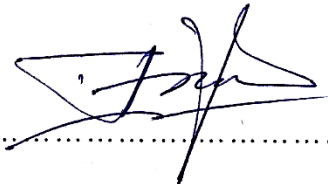


Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

1. Mohammad Nurul Misbah, S.T., M.T.



2. Totok Yulianto, S.T., M.T.



SURABAYA, 17 JULI 2018

Dipersembahkan kepada Tuhan Y.M.E., kedua orang tua, keluarga, dosen, dan teman-teman
tercinta atas segala dukungan dan doanya

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas karunianya Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.

Pada kesempatan ini Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu penyelesaian Tugas Akhir ini, yaitu:

1. Mohammad Nurul Misbah, S.T., M.T. dan Totok Yulianto, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan dan motivasinya selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini;
2. Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng, Ph.D dan Septia Hardy Sujiatanti, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji yang telah memberi kritik dan sarannya atas revisi Laporan Tugas Akhir ini;
3. Hasanudin, S.T., M.T. selaku Kepala Laboratorium Desain Kapal Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS dan Dosen Penguji atas bantuannya selama pengerjaan Tugas Akhir dan atas ijin pemakaian fasilitas laboratorium;
4. PT Daya Radar Utama Lamongan yang telah memberikan data kapal untuk pelaksanaan pengerjaan Laporan Tugas Akhir;
5. Hendra Ody, Heri Setyawan, Tino Sujatmiko, Refdi, Resa, Hari Prasetyo, Zakki Rabbani, dan semua rekan penulis yang telah membantu dan memberi semangat dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir;
6. Ibu dan ayah penulis yang secara tidak langsung telah membantu dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir;

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, sehingga kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan. Akhir kata semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, 18 Juli 2018

Erlangga Fandra Zandi

ANALISA PENJALARAN RETAK SEKAT RUANG MUAT KAPAL TANKER 17500 DWT AKIBAT BEBAN MUATAN DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama Mahasiswa : Erlangga Fandra Zandi
NRP : 4112100056
Departemen / Fakultas : Teknik Perkapalan / Teknologi Kelautan
Dosen Pembimbing : 1. Mohammad Nurul Misbah, S.T., M.T.
2. Totok Yulianto, S.T., M.T.

ABSTRAK

Kapal *Tanker* memiliki keistimewaan dalam bentuk konstruksi. Pada kapal tersebut dijumpai berbagai jenis struktur berupa sambungan pelat yang rawan terhadap terjadinya retak, salah satunya adalah konstruksi sekat ruang muat. Pada sekat tersebut terjadi pembebanan fluktuatif akibat muatan maupun pergerakan gelombang sehingga dalam periode tertentu dapat menimbulkan *fatigue fracture*. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilaksanakan analisa mengenai penjalaran retak sekat ruang muat Kapal Tanker 17500 DWT dengan menggunakan metode elemen hingga. Melalui metode tersebut, dibuat pemodelan tiga ruang muat kapal untuk menentukan area nodal tegangan normal maksimum. Setelah itu, nilai tegangan tersebut diaplikasikan pada pemodelan retak untuk menentukan nilai faktor intensitas, laju penjalaran retak, jumlah siklus, maupun umur kelelahan struktur. Dengan demikian, maka diperoleh nilai tegangan normal maksimum sebesar 6,85 MPa. Setelah itu, dengan kedalaman awal retak sebesar 0,5 mm, 1,5 mm, dan 2,5 mm, maka menghasilkan nilai laju perambatan retak (da/dN) berturut-turut sebesar $8,14 \times 10^{-9}$ m / cycle, $4,44 \times 10^{-8}$ m / cycle, dan $9,68 \times 10^{-8}$ m/cycle. Sehingga dengan mengkonversi kedalam bentuk siklus, maka didapatkan nilai *fatigue* pada kedalaman awal retak tersebut sebesar 30,88 tahun, 9,10 tahun, dan 5,11 tahun.

Kata kunci: Tegangan normal maksimum, faktor intensitas tegangan, laju perambatan retak, jumlah siklus, umur kelelahan

CRACK PROPAGATION ANALYSIS OF CARGO BULKHEAD OF TANKER 17500 DWT DUE TO TANK LOADS USING FINITE ELEMENT METHOD

Author : Erlangga Fandra Zandi
ID No. : 4112100056
Dept. / Faculty : Naval Architecture & Shipbuilding Engineering / Marine Technology
Supervisors : 1. Mohammad Nurul Misbah, S.T., M.T.
2. Totok Yulianto, S.T., M.T.

ABSTRACT

Tanker has own features in its constructions. There are found various types of connection plates that are liable to propagate as cracks, one of which is cargo bulkhead construction. This construction occurs some fluctuating loads due to tank and wave loads that can cause failure of the fatigue structure. So, this study is to be carry out a crack propagation analysis of cargo bulkhead of Tanker 17500 DWT using Finite Element Method. Using this method, the longitudinal extent of the midship cargo tank finite element (FE) model is to cover three cargo tank lengths about midships to achieve the required values of maximum normal stress. After that, this stress is to be applied by crack model to determine the stress intensity factor, crack propagation rate, number of cycles, and fatigue life. Therefore, it takes a maximum normal stress value of approximately 6,85 MPa. After that, by using the crack initiations of 0,5 mm, 1,5 mm, and 2,5 mm, the crack propagation rates are to be reached of $8,14 \times 10^{-9}$ m / cycle, $4,44 \times 10^{-8}$ m / cycle, and $9,68 \times 10^{-8}$ m/cycle. So, if they are converted into number of cycles, the fatigue life values are to be determined of approximately 30,88 years, 9,10 years, and 5,11 years.

Keywords: Maximum normal stress, stress intensity factor, crack propagation rate, number of cycle, fatigue life

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR REVISI.....	iv
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR SIMBOL	xiv
Bab I PENDAHULUAN	1
I.1. Latar Belakang Masalah.....	1
I.2. Perumusan Masalah.....	2
I.3. Tujuan.....	2
I.4. Batasan Masalah.....	2
I.5. Manfaat.....	3
I.6. Hipotesis	3
Bab II STUDI LITERATUR	5
II.1. Dasar Teori	5
II.1.1. Sekat Melintang pada Kapal	6
II.1.2. Sekat bergelombang	7
II.1.3. Teori pemodelan struktur	8
II.1.4. Teori Pendiskritan sistem analisis.....	10
II.1.5. Teori kondisi batas pada pemodelan struktur	12
II.1.6. Teori pembebanan pada pemodelan struktur	14
II.1.7. Teori Tegangan normal.....	21
II.1.8. Teori Mekanika Kelelahan struktur	22
II.1.9. Teori Penjalaran Retak.....	23
II.1.10. Metode Elemen Hingga	26
II.2. Tinjauan Pustaka	27
Bab III METODOLOGI	33
III.1. Diagram Alir.....	33
III.2. Penentuan Metode Pengumpulan dan Pengolahan Data	35
III.3. Penentuan Sumber Data	36
III.4. Pembuatan Pemodelan Global.....	38
III.5. Penentuan Elemen <i>Mesh</i> pada Pemodelan Global	40
III.6. Penentuan Kondisi Batas pada Pemodelan Global.....	41
III.7. Penentuan Kondisi Pembebanan pada Model Global	45
III.8. Hasil <i>Running</i> Program	50
III.9. Pembuatan Pemodelan Lokal	50
III.10. Pembuatan Elemen <i>Mesh</i> pada Pemodelan Lokal	52

III.11.	Penentuan Pembebanan dan Hasil <i>Running</i> pada Pemodelan Lokal.....	54
III.12.	Analisa Pehitungan Laju Penjalaran Retak dan Umur Kelelahan	55
Bab IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	57
IV.1.	Data Struktur	57
IV.2.	Data Lingkungan	58
IV.3.	Analisa Tegangan pada Model Global	58
IV.4.	Analisa Tegangan pada Sekat Ruang Muat.....	60
IV.5.	Analisa Penentuan parameter K_I	61
IV.6.	Analisa Perhitungan penjalaran retak.....	63
IV.7.	Analisa perhitungan <i>Fatigue</i> pada material.....	63
Bab V	KESIMPULAN DAN SARAN.....	67
V.1.	Kesimpulan.....	67
V.2.	Saran.....	67
	DAFTAR PUSTAKA.....	69
	LAMPIRAN A PERHITUNGAN BEBAN KAPAL	73
	LAMPIRAN B PERHITUNGAN PENJALARAN RETAK ...	Error! Bookmark not defined.
	BIODATA PENULIS	Error! Bookmark not defined.
	KESIMPULAN	
	LAMPIRAN A PERHITUNGAN BEBAN KAPAL	
	LAMPIRAN B PERHITUNGAN PENJALARAN RETAK	

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1. Konstruksi Sekat Ruang Muat	7
Gambar II.2. Konstruksi Sekat Bergelombang Kapal Tanker	8
Gambar II.3. Permodelan Tiga Ruang Muat pada Kapal	9
Gambar II.4. Bentuk Elemen <i>Meshing</i> Permodelan Struktur	11
Gambar II.5. Tiga Mode Pembebanan saat Proses Penjalaran Retak	24
Gambar II.6. Perbandingan N dan a untuk Variasi a_i Sebesar 0.5 mm, 1 mm, dan 1.5 mm ...	28
Gambar III.1. Diagram Alir Penelitian	34
Gambar III.2. <i>General Arrangement</i> Kapal Tanker 17500 DWT	37
Gambar III.3. Permodelan Sebuah Tanki Ruang Muat	39
Gambar III.4 Permodelan Tanki Tiga Ruang Muat	39
Gambar III.5. <i>Meshing</i> Pemodelan Tiga Ruang Muat Kapal	40
Gambar III.6. Pengaturan Detail <i>Remote Point</i>	42
Gambar III.7. Titik <i>Independent Point</i> pada Ujung Model	42
Gambar III.8. <i>Remote Displacement</i> yang Terhubung pada <i>Rigid Link</i>	42
Gambar III.9. <i>Detail Scope</i> dan Definition pada <i>Remote Displacement Support</i>	42
Gambar III.10. Penentuan Posisi <i>Ground Spring</i> pada Kedua Ujung Model	43
Gambar III.11. Detail Penentuan <i>Input Ground Spring</i> pada Model	44
Gambar III.12. Penentuan Peletakan <i>Ground Spring</i> pada Arah Sumbu y dan z	44
Gambar III.13. Input Beban Mode <i>Tubular Data</i>	49
Gambar III.14. Input Data <i>Moment – Remote Point</i>	49
Gambar III.15. Pemodelan Lokal Irisan Potongan Pelat	51
Gambar III.16. Pemodelan Retak pada Irisan Pelat	51
Gambar III.17. Pengaturan Detail Desain Struktur <i>Crack</i>	52
Gambar III.18. <i>Face Sizing Mesh</i> dengan Mode <i>Tetrahedon</i>	53
Gambar III.19. Perhitungan K_I melalui Menu <i>Parameter Set</i>	54
Gambar IV.1. <i>Midship Section</i> Kapal Tanker 17500 DWT	57

Gambar IV.2. Tegangan Normal Maksimum pada Kondisi <i>Sagging</i>	59
Gambar IV.3. Tegangan Normal Maksimum pada Kondisi <i>Hogging</i>	59
Gambar IV.4. Fotoelastis Sekat Tiga Ruang Muat Kapal	60
Gambar IV.5. Area Hotspot Sekat Ruang Muat menurut CSR-T	60
Gambar IV.6. Struktur Kekuatan Sekat Ruang Muat Kapal pada Saat Kondisi <i>Hogging</i>	61
Gambar IV.7. Struktur Kekuatan Sekat Ruang Muat Kapal pada Saat Kondisi <i>Sagging</i>	61
Gambar IV.8. Perhitungan ΔK_I pada Material	62
Gambar IV.9. Perhitungan <i>Fatigue</i> untuk Kedalaman Retak Awal 0.5 mm.....	64
Gambar IV.10. Perhitungan <i>Fatigue</i> untuk Kedalaman Retak Awal 1.5 mm.....	65
Gambar IV.11. Perhitungan <i>Fatigue</i> untuk Kedalaman Retak Awal 2.5 mm.....	66

DAFTAR TABEL

Tabel II.1. Penentuan Kondisi Batas Pemodelan	13
Tabel II.2. Umur Kelelahan pada Material akibat Kegagalan <i>Fatigue</i>	27
Tabel II.3. Intensitas Tegangan pada Tiap RPM	29
Tabel III.1. Data <i>Material Properties</i> ASTM A36 – <i>Structural Steel</i>	37
Tabel III.2. Hasil Perhitungan <i>Vertical Spring Stiffness</i> pada Tiap <i>Node</i>	44
Tabel III.3. Hasil Perhitungan <i>Horisontal Spring Stiffness</i> pada Tiap <i>Node</i>	44
Tabel III.4. Perhitungan Beban Gelombang Dinamis Vertikal	45
Tabel III.5. Perhitungan Beban Gelombang Dinamis Horisontal	46
Tabel III.6. Perhitungan Beban Amplitudo untuk Tanki I	47
Tabel III.7. Perhitungan Beban Amplitudo untuk Tanki II	48
Tabel III.8. Perhitungan Beban Amplitudo untuk Tanki III.....	48
Tabel III.9. Dimensi Irisan Potongan <i>Lower Stool</i> dan Sekat <i>Corrugated</i>	51
Tabel IV.1. Data Kapal Tanker 17500 DWT	57
Tabel IV.2. Besaran Nilai Gelombang Signifikan di Perairan Indonesia Per Musim	58
Tabel IV.3. Perhitungan ΔK_I pada Material	62
Tabel IV.4. Perhitungan Analisa Laju Perambatan Retak	63
Tabel IV.5. Perhitungan <i>Fatigue</i> untuk Kedalaman Retak Awal 0,5 mm.....	64
Tabel IV.6. Perhitungan <i>Fatigue</i> untuk Kedalaman Retak Awal 1,5 mm.....	65
Tabel IV.7. Perhitungan <i>Fatigue</i> untuk Kedalaman Retak Awal 2,5 mm.....	66

DAFTAR SIMBOL

B_{local}	=	Lebar lokal pada <i>Garis Waterline</i>	m
C_b	=	Koefisien blok kapal	
C_{b-LC}	=	Koefisien blok pada kondisi pembebanan tertentu	
C_{wv}	=	Koefisien gelombang	
L_{CSR-T}	=	Panjang konstruksi kapal	(m)
M_{wv-h}	=	Momen <i>bending</i> horisontal	(kNm)
$M_{wv-h-amp}$	=	Momen <i>bending</i> horisontal siklis	(kNm)
M_{wv-hog}	=	Momen <i>bending</i> vertikal pada saat kondisi <i>hogging</i>	(kNm)
M_{wv-sag}	=	Momen <i>bending</i> vertikal pada saat kondisi <i>sagging</i>	(kNm)
$M_{wv-v-amp}$	=	Momen <i>bending</i> vertikal siklis	(kNm)
P_{hys}	=	Beban gelombang statis	(kN/m ²)
P_{in-lng}	=	Beban tanki dinamis pada arah memanjang	(kN/m ²)
P_{in-t}	=	Beban tanki dinamis pada arah melintang	(kN/m ²)
P_{in-tk}	=	Beban tanki Hidrostatik	(kN/m ²)
$P_{in-t-tk1}$	=	Beban tanki dinamis arah melintang untuk tanki 1	(kN/m ²)
$P_{in-t-tk2}$	=	Beban tanki dinamis arah melintang untuk tanki 2	(kN/m ²)
P_{in-v}	=	Beban tanki dinamis pada arah vertikal	(kN/m ²)
$P_{in-v-tk1}$	=	Beban tanki dinamis arah vertikal untuk tanki 1	(kN/m ²)
$P_{in-v-tk2}$	=	Beban tanki dinamis arah vertikal untuk tanki 2	(kN/m ²)
T_{LC}	=	Jarak vertikal antara <i>baseline</i> dengan <i>load point</i>	(m)
T_{sc}	=	Sarat kapal yang direncanakan	(m)
U_{pitch}	=	Periode <i>pitch</i>	(s)
U_{roll}	=	Periode <i>roll</i>	(s)
f_t	=	Faktor kombinasi beban arah melintang	
f_v	=	Faktor kombinasi beban arah vertikal	
$r_{roll-gyr}$	=	Radius putaran <i>roll</i>	(m)
z_{tk}	=	Jarak vertikal dari bagian tanki tertinggi	(m)

ρ_{sw}	=	Massa jenis air laut	(tonnes/m ³)
σ_{max}	=	Tegangan normal maksimum	(MPa)
$\sigma_{max-hog}$	=	Tegangan normal maksimum pada saat kondisi <i>hogging</i>	(MPa)
$\sigma_{max-sag}$	=	Tegangan normal minimum pada saat kondisi <i>sagging</i>	(MPa)
σ_{min}	=	Tegangan normal minimum	(MPa)
a	=	Panjang kedalaman retak	(mm)
a_0	=	Parameter percepatan	
a_f	=	Panjang kedalaman retak akhir	(mm)
a_{heave}	=	Percepatan <i>vertical</i> saat kapal mengalami <i>heave</i>	(m/s ²)
a_{lng}	=	Akselerasi memanjang	(m/s ²)
a_o	=	Panjang kedalaman retak awal	(mm)
$a_{pitch-x}$	=	Percepatan <i>longitudinal</i> saat kapal mengalami <i>pitch</i>	(m/s ²)
$a_{pitch-z}$	=	Percepatan <i>vertical</i> saat kapal mengalami <i>pitch</i>	(m/s ²)
a_{roll-y}	=	Percepatan <i>traversal</i> saat kapal mengalami <i>roll</i>	(m/s ²)
a_{roll-z}	=	Percepatan <i>vertical</i> saat kapal mengalami <i>roll</i>	(m/s ²)
a_{surge}	=	Percepatan <i>longitudinal</i> saat kapal mengalami <i>surge</i>	(m/s ²)
a_{sway}	=	Percepatan <i>traversal</i> saat kapal mengalami <i>sway</i> dan <i>yaw</i>	(m/s ²)
a_t	=	Akselerasi melintang	(m/s ²)
a_v	=	Akselerasi vertikal	(m/s ²)
b	=	Lebar konstruksi	(m)
B	=	Lebar <i>moulded</i>	(m)
C	=	Koefisien bentuk material	
D	=	Tinggi <i>moulded</i>	(m)
da	=	Pertambahan panjang retak	(m)
da/dN	=	Kecepatan penjarangan retak	(m/cycles)
dN	=	Pertambahan jumlah siklus dari beban	(cycles)
E	=	Modulus Young	(MPa)
F	=	Umur material	(s)
F_{mx}	=	Momen gaya arah rotasi sumbu x	(Nm)
F_{my}	=	Momen gaya arah rotasi sumbu y	(Nm)
F_{mz}	=	Momen gaya arah rotasi sumbu z	(Nm)
f_{wv-h}	=	Faktor distribusi momen <i>bending</i> horisontal	
f_{wv-v}	=	Faktor distribusi momen <i>bending</i> vertikal	

F_x	=	Gaya arah translasi sumbu x	(N)
F_y	=	Gaya arah translasi sumbu y	(N)
F_z	=	Gaya arah translasi sumbu x	(N)
g	=	Percepatan gravitasi	(m/s ²)
GM	=	Tinggi metasentrik	(m)
h	=	Tinggi konstruksi	(m)
h_{WL}	=	Tinggi vertikal dari <i>baseline</i> menuju tinggi beban gelombang max.	(m)
K_I	=	Faktor intensitas tegangan mode I	(MPa√m)
K_{IC}	=	Faktor ketangguhan material	(MPa√m)
L_{BP}	=	Panjang F.P. menuju A.P.	(m)
m	=	Konstanta material	
N	=	Siklus tegangan	(cycle)
P_1	=	Beban gelombang dinamis 1	(kN/m ²)
P_2	=	Beban gelombang dinamis 2	(kN/m ²)
P_{ex-dyn}	=	Beban gelombang dinamis <i>envelope</i>	(kN/m ²)
P_{WL}	=	Beban pada <i>waterline</i>	(kN/m ²)
t	=	Tebal material	(mm)
T	=	Sarat kapal	(m)
V	=	Kecepatan maksimum kapal	(knots)
V_s	=	Kecepatan service kapal	(knots)
x	=	Jarak <i>Longitudinal</i> antara A.P. dengan <i>Load Point</i>	(m)
y	=	Koordinat <i>Tranversal</i> antara <i>Baseline</i> dengan <i>Load Point</i>	(m)
Δa	=	Rentang kedalaman retak	(mm)
ΔK	=	Rentang nilai <i>stress intensity factor</i>	(MPa√m)
ΔN	=	Rentang siklus tegangan	(cycle)
z	=	Koordinat <i>vertical</i> antara <i>Centerline</i> dengan <i>Load Point</i>	(m)
θ	=	Sudut <i>roll</i>	(radians)
φ	=	Sudut <i>Pitch</i>	(radians)

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang Masalah

Terdapat banyak catatan kecelakaan kapal yang terjadi akibat keretakan struktur. Sebagai contohnya adalah Kapal MV Derbyshire yang mengalami kecelakaan pada Bulan September 1980 di Okinawa, Jepang (Faulkner, 2001), Kapal KM Dumay Express di Bulan November 2009 yang terjadi akibat keretakan pada lambung kapal sehingga menewaskan 42 orang (Rianto, 2011), Kapal MV. Marina Baru di Bulan Desember 2015 yang terjadi akibat kebocoran kamar mesin sehingga menewaskan 66 penumpang (Luis, 2009), serta Kapal MT. Prestige yang mengalami *fast fracture* sehingga badan kapal patah (Vince, 2003).

Kelelahan struktur (*fatigue*) merupakan salah satu jenis kegagalan struktur yang menyebabkan kapal mengalami kerusakan, kebocoran, keretakan, hingga patah. Kelelahan struktur sangat dipengaruhi oleh beban siklis, seperti: beban gelombang, beban muatan, beban *sloshing*, dan beban angin. Jika suatu struktur telah melewati batas umur kelelahannya, maka akan terjadi sebuah keretakan (*crack*) yang dimulai dari inisiasi retak, penjaran retak stabil, *fast fracture*, hingga nantinya menjadi patah (*fracture*). Kegagalan struktur pada kapal sering terjadi pada daerah-daerah kritis (*hotspot*), seperti: area *hatch coaming*, *deck*, *bracket*, penegar *longitudinal & transversal*, *side shell*, maupun *bulkhead*. Dalam analisa perhitungan konstruksi Kapal Tanker, retak sering terjadi pada area Sekat Ruang Muat (*Cargo Bulkhead*). Hal tersebut terjadi karena pada Kapal *Tanker* sering mengalami pembebanan fluktuatif akibat muatan fluida dan gelombang air laut.

Oleh karena itu, perlu dilakukan penanganan khusus untuk mengatasi permasalahan *fracture*, salah satunya adalah dengan menghitung penjaran retak material kapal hingga menentukan umur konstruksinya. Perhitungan umur konstruksi pada kapal merupakan hal yang penting untuk dianalisa. Hal tersebut dapat digunakan sebagai pertimbangan untuk melakukan investasi pada pembangunan kapal baru maupun pembelian kapal bekas (*Second-hand ship*). Perhitungan umur konstruksi kapal ini telah banyak diatur didalam regulasi yang dikeluarkan oleh biro klasifikasi, sehingga metode perhitungannya dapat dilakukan dengan mengacu pada aturan klasifikasi yang akan dipakai.

Aturan-aturan perhitungan umur konstruksi dengan menggunakan analisa *fatigue* dapat ditemui pada aturan kesepakatan bersama, seperti: Regulasi *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers* (CSR-T) yang merupakan hasil kolaborasi dari beberapa klasifikasi dunia seperti LR, ABS, DNV, NK, dll dalam wadah IACS. Melalui regulasi CSR, maka dapat ditentukan nilai *fatigue* melalui rumus *finite element*, seperti: pembebanan, permodelan, dll.

Oleh karena itu pada penelitian ini dilaksanakan analisa mengenai penjalaran retak sekat ruang muat Kapal *Tanker* 17500 DWT dengan metode elemen hingga. Melalui metode elemen hingga, dapat diketahui nilai tegangan normal maksimum. Sedangkan melalui metode mekanika kepecahan, maka dapat diketahui umur *fatigue life* suatu kapal.

I.2. Perumusan Masalah

Sehubungan dengan latar belakang di atas, permasalahan yang akan dikaji dalam Penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh dimensi retak terhadap faktor intensitas tegangan.
2. Berapa pengaruh dimensi retak terhadap laju perambatan retak.
3. Bagaiman pengaruh dimensi retak terhadap umur konstruksi kapal.

I.3. Tujuan

Berdasarkan uraian di atas, maka tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh dimensi retak terhadap faktor intensitas tegangan.
2. Mengetahui pengaruh dimensi retak terhadap laju perambatan retak.
3. Mengetahui pengaruh dimensi retak terhadap umur konstruksi kapal.

I.4. Batasan Masalah

Dalam pengerjaan penelitian, batasan permasalahan yang menjadi tolak ukur hasil perhitungan analisis difokuskan pada:

1. Struktur yang dikaji merupakan Kapal *Tanker* 17500 DWT dengan kelas NK.
2. Perhitungan tegangan siklik pada sekat didapatkan melalui kondisi *sagging* dan *hogging*.
3. Beban lingkungan yang ditinjau adalah beban kapal yang terjadi pada saat kapal sedang dengan kondisi membawa muatan.
4. *Crack* diasumsikan *semi elliptical crack* dengan a_0 berdasarkan code ABS, yaitu: 0.5 mm.
5. Mode retak yang digunakan adalah mode *opening* yang memperhitungkan gaya aksial.

I.5. Manfaat

Dalam pengerjaan penulis, penulis ingin berkontribusi terhadap aspek disiplin ilmu pada masyarakat luas dengan cara:

1. Secara akademis, diharapkan hasil pengerjaan Tugas Akhir ini dapat dijadikan refrensi dalam proses analisa perhitungan *fracture mechanic*.
2. Secara praktek, diharapkan hasil dari Tugas Akhir ini dapat dijadikan referensi dalam menentukan umur konstruksi Kapal Tanker 17500 DWT.

I.6. Hipotesis

Hipotesis yang diambil dari penelitian ini adalah sifat perambatan retak dipengaruhi oleh dimensi cacat retak. Semakin dalam retak, maka semakin bertambah laju perambatan retak dan variabel keretakan

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

STUDI LITERATUR

II.1. Dasar Teori

Dalam melaksanakan analisa penjalaran retak Sekat Ruang Muat Kapal Tanker 17500 DWT, terdapat beragam jenis metode untuk menyelesaikan permasalahan analisa *structural*, salah satunya adalah Metode Elemen Hingga. Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method* - FEM) merupakan prosedur numerik yang dapat diterapkan untuk memperoleh solusi dari berbagai macam masalah dalam bidang keteknikan (Moaveni, 1999). Metode elemen hingga umumnya digunakan untuk permasalahan kompleks analisa struktur, pembebanan, dan sifat material yang susah dilaksanakan secara perhitungan matematis. Penyelesaian metode tersebut memberikan hasil / penyelesaian pendekatan dari nilai yang tidak diketahui pada titik tertentu dalam sistem yang kontinyu (Logan, 2011). Sistem yang kontinyu adalah istilah dari kondisi struktur/objek yang sebenarnya. Melalui metode tersebut, dilaksanakan pemodelan suatu struktur yang dilakukan untuk mendeskripsikan dimensi kedalam formulasi matematis. Selain itu, dilaksanakan pula langkah pendekatan diskretisasi elemen dan penentuan kondisi batas. Teori pendiskritan merupakan pembagian struktur menjadi sebuah sistem ekivalen yang terdiri dari elemen-elemen hingga. Sedangkan kondisi batas dilaksanakan untuk memenuhi keseimbangan dan kompatibilitas pada simpul struktur. Hasil dari perhitungan analisis elemen hingga dapat berupa tegangan, regangan, deformasi, dll. Melalui penentuan nilai hasil tegangan tersebut, maka dapat dilaksanakan perhitungan analisa *fracture mechanics* untuk menentukan parameter penjalaran retak.

Fracture mechanics merupakan suatu analisis penyelesaian perhitungan kepecahan dengan cara mendefinisikan kondisi lokal dari tegangan dan regangan di sekitar retakan yang dikorelasikan dengan parameter-parameter globalnya (geometri dan tegangan struktur) dimana retakan akan merambat. Analisa pendekatan *fracture mechanics* terdiri dari beberapa parameter kepecahan, salah satunya adalah *factor* intensitas tegangan (*stress intensity factor*) atau K. Melalui *factor* intensitas tegangan tersebut, maka dapat diketahui apakah suatu konfigurasi retak pada komponen akan mudah merambat atau tidak. Semakin besar harga K, maka retak akan semakin mudah merambat. Setelah menentukan harga K, maka dapat diketahui nilai laju

perambatan retak, siklus, hingga umur material. Laju perambatan retak merupakan fungsi dari faktor intensitas tegangan. Siklus pembebanan berjalan seiring perkembangan retak, yaitu dari daerah retakan yang memiliki intensitas tegangan yang paling tinggi. Melalui penjumlahan total siklus fase perambatan retak, maka dapat diketahui umur konstruksi material.

II.1.1. Sekat Melintang pada Kapal

Sekat merupakan partisi vertikal dalam kapal yang disusun secara melintang maupun memanjang kapal (Eyres, 2007). Sekat pada posisi arah melintang dapat dijumpai pada semua tipe kapal dan menjadi persyaratan utama oleh Biro Klasifikasi. Sekat melintang utama kapal harus menggunakan sekat yang bersifat kedap air. Sekat tersebut dipasang pada lokasi *web frame* dan berdiri diatas wrang penuh. Sekat melintang dibangun mulai dari batas *double bottom* hingga ke *upper deck*, kecuali sekat tubrukan dan sekat ceruk buritan yang hanya sampai pada geladak pertama diatas *waterline*. Adapun fungsi sekat melintang adalah:

1. Membagi kapal atas kompartemen-kompartemen dan membagi tekanan kapal ke arah bidang
2. Mempertinggi keselamatan kapal terutama ketika terjadi kerusakan dibawah permukaan air atau didekatnya, misalnya karena kandas, tubrukan, kebakaran, dll.
3. Mempertinggi keselamatan dan kekuatan melintang kapal.

Berdasarkan peraturan yang telah ditentukan oleh Biro Klasifikasi (BKI), jumlah sekat melintang kapal tergantung daripada letak kamar mesin yang telah ditentukan. Pada kapal dengan kamar mesin dibelakang, jumlah sekat melintang yang dipasang minimal sebanyak tiga buah, sedangkan pada kapal dengan kamar mesin ditengah minimal empat buah. Adapun jenis sekat melintang pada kapal adalah sebagai berikut:

1. Sekat Ceruk Buritan (*After Peak Tank Bulkhead*)

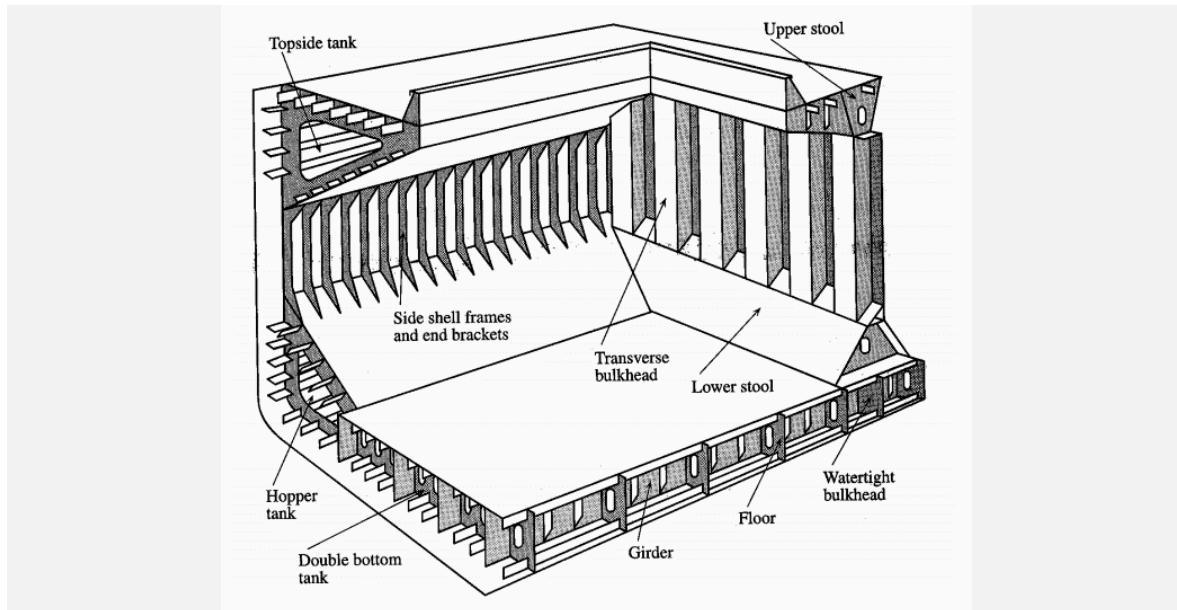
Sekat ini digunakan untuk pembatas antara tangki ceruk buritan (*after peak bulkhead*) dengan ruang mesin (*machinery space*).

2. Sekat Kamar Mesin (*Machinery Space Bulkhead*)

Sekat ini diletakkan di depan kamar mesin kapal. Peletakkannya pun memiliki aturan, yaitu dengan ketentuan jarak minimal sekat terhadap garis AP sebesar 17% L konstruksi dan maksimal sebesar 20% L konstruksi.

3. Sekat Ruang Muat (*Cargo Hold Bulkhead*)

Sekat ini (Gambar II.1) diletakkan di daerah Ruang Muat Kapal. Sekat ini wajib bersifat *watertight* atau kedap air. Peletakkan sekat tersebut telah diatur oleh masing-masing *class*.



Gambar II.1. Konstruksi Sekat Ruang Muat

(Sumber: International Association of Classification Societies, 2003)

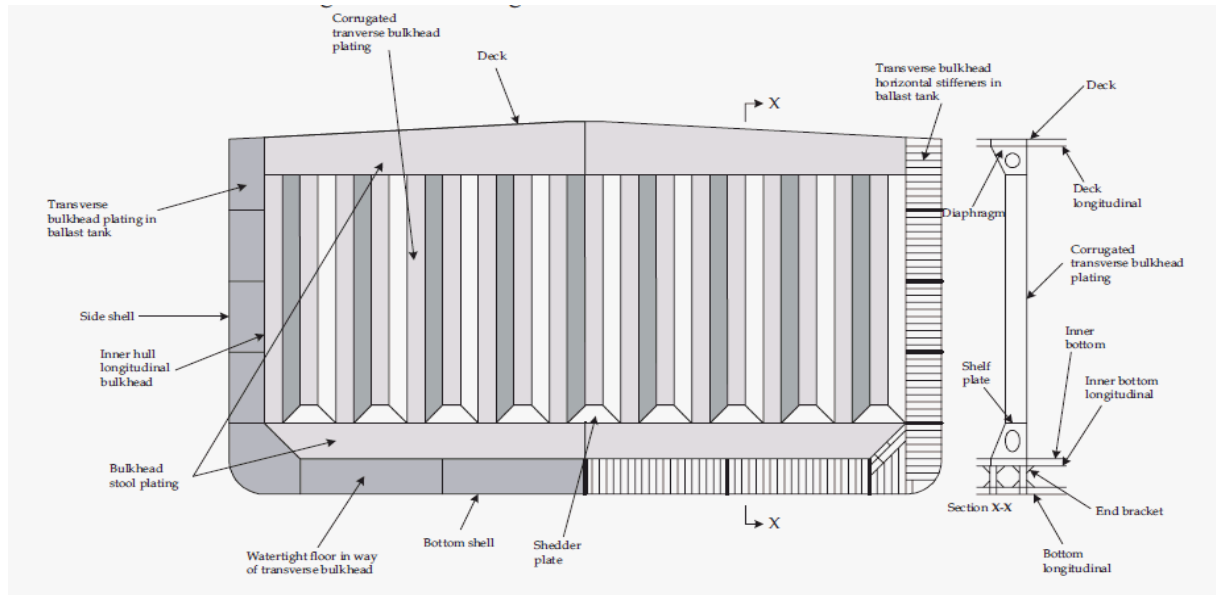
4. Sekat Tubrukan (*Collision Bulkhead*)

Sekat ini harus memiliki kekuatan yang lebih daripada sekat melintang yang lain. Sekat ini digunakan sebagai pembatas apabila suatu waktu kapal mengalami kecelakaan. Peletakkan sekat ini memiliki aturan, dimana jarak minimum sekat adalah 0.05 L Konstruksi dari Garis FP dan maksimal adalah 0.08 L Konstruksi.

II.1.2. Sekat bergelombang

Dengan adanya muatan yang bermacam-macam jenisnya, maka diperlukan konstruksi partisi kapal yang kuat dan lebih efisien dalam penggunaannya, salah satunya ialah penerapan sekat bergelombang. Sekat bergelombang merupakan jenis konstruksi sekat yang terdiri dari pelat-pelat paralel dan dihubungkan oleh pelat miring pada tiap ujungnya. Kedua pelat tersebut memiliki kekuatan yang sama dalam menahan tekanan cairan dan keduanya dapat memiliki ketebalan yang sama dengan lebar yang sama. Dalam hal itu, sekat bergelombang dapat dibuat dari satu lembar pelat yang dibentuk dengan cara ditebuk (Okumoto, 2009).

Sekat bergelombang (Gambar II.2) terdiri dari beberapa bagian elemen pelat yang mempunyai lekukan (gelombang) dan disambung dengan system pengelasan. Sudut -sudut elemen pelat gelombang (*alpha*) berukuran minimum 45°. Ketebalan sekat bergelombang tidak boleh kurang dari persyaratan yang telah ditentukan karena pada sekat tersebut tidak memiliki komponen struktur penegar.



Gambar II.2. Konstruksi Sekat Bergelombang Kapal Tanker
(Sumber: Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers, 2015)

Keuntungan pemakaian sekat bergelombang adalah:

1. Penghematan berat yang relatif besar bila dibandingkan dengan sekat rata berpenegar.
2. Mempunyai konstruksi yang lebih sederhana dan pengelasan berkurang.
3. Sekat lebih mudah dibersihkan, terutama pada kapal-kapal tangki.
4. Mempermudah pemuatan barang pada kapal-kapal kargo.

II.1.3. Teori pemodelan struktur

Pemodelan struktur merupakan kunci utama dalam suatu analisis, tanpa adanya model tidak akan terjadi proses suatu analisis. Model dapat berupa model fisik, matematis, maupun grafik. Model dapat digunakan untuk menerangkan desain atau rancangan. Model harus mampu mendemonstrasikan *suitability*, *workability* dan *constructability* dari konsep (Murdjito, 1996). Model dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama yaitu *display model* dan *engineering model*. Dalam tugas akhir ini penulis menggunakan model matematis sebagai dasar analisis. Model matematis merupakan suatu model yang dapat mendeskripsikan dimensi dan karakteristik dari prototipe kedalam formulasi matematis. Model harus bisa memenuhi prinsip kesamaan yang mencakup (Chakrabarti, 1994):

1. Kesamaan Kinematis

Sebangun kinematik terjadi antara *prototipe* dan model jika *prototipe* dan model sebangun geometri, perbandingan kecepatan, dan percepatan di dua titik yang bersangkutan pada prototipe dan model pada arah yang sama adalah sama besar.

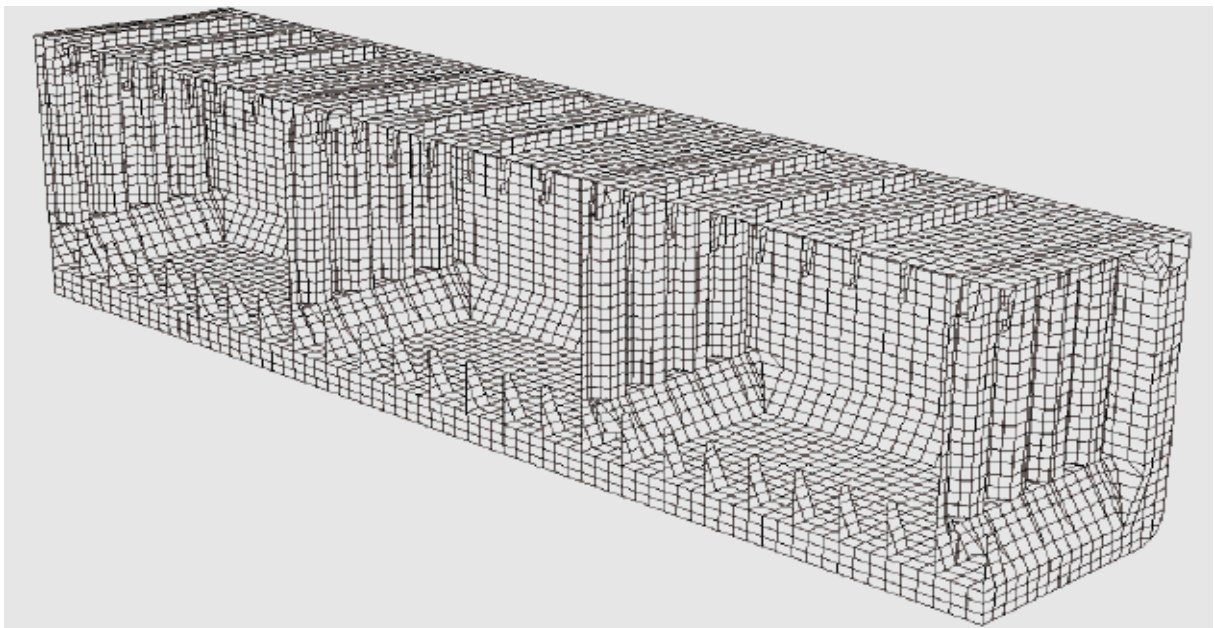
2. Kesamaan Geometrik

Kesamaan geometrik dapat dipenuhi apabila model dan *protipe* memiliki kesamaan geometrik baik ukuran maupun bentuk. Ada dua macam prinsip kesamaan geometrik, yaitu kesamaan geometrik sempurna (*Undistorted*) dan kesamaan geometrik terdistorsi (*distorted*). Pada *undistorted model*, skala panjang dan lebar (horisontal) serta skala tinggi (vertikal) adalah sama. Untuk *distorted model*, skala ke arah horisontal dan ke arah vertikal tidak sama. Apabila dimungkinkan model dibuat dengan tanpa distorsi, sedangkan pada permasalahan khusus model dapat terdistorsi namun harus memenuhi persyaratan tertentu.

3. Kesamaan Dinamis

Jika *prototipe* dan model sebangun geometrik dan kinematik, serta perbandingan gaya-gaya yang bersangkutan pada model dan *prototipe* untuk seluruh aliran pada arah yang sama adalah sama besar, maka dapat dikatakan bahwa keduanya sebangun dinamik.

Berdasarkan *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers (CSR-T) Appendix B*, analisa *finite elementt* pada umur konstruksi kapal dapat dilaksanakan dengan memodelkan struktur tiga ruang muat (Gambar II.3) pada daerah *midship* kapal secara *prismatic*. Permodelan tersebut merupakan representasi dari seluruh konstruksi kapal, karena telah diasumsikan bahwa tegangan paling besar terjadi pada daerah sekitar *midship*. Tegangan tersebut terjadi karena adanya pengaruh tekanan eksternal dan internal yang diterima oleh kapal, sehingga kapal mengalami reaksi dinamis, seperti: *trim*, *rolling*, *sagging*, *hogging*, dll.



Gambar II.3. Permodelan Tiga Ruang Muat pada Kapal

(Sumber: Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers, 2015)

Dalam pembuatan model *finite element*, Jika masing-masing konstruksi tanki ruang muat memiliki panjang yang berbeda-beda, maka tanki bagian tengah pada model merepresentasikan tanki ruang muat yang paling panjang. Model harus dipasang penegar besar, penegar kecil, maupun struktur komponen pendukung yang lain. Model pun juga harus dipasang sekat melintang pada kedua ujung depan dan belakang. Jika sekat tersebut merupakan *corrugated bulkhead*, maka harus dipasang pula komponen *stool* beserta konstruksi *bracket* pada bagian depan maupun belakang.

II.1.4. Teori Pendiskritan sistem analisis

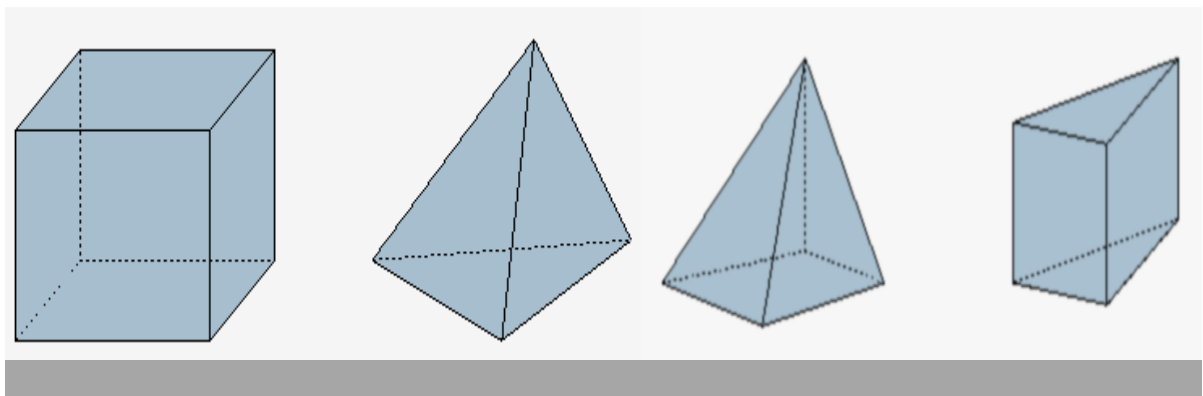
Teori pendiskritan merupakan pembagian struktur menjadi sebuah sistem ekuivalen yang terdiri dari elemen-elemen hingga yang saling dihubungkan dengan simpul serta pemilihan jenis elemen yang tepat (Murdjito, 1996). Jumlah elemen yang digunakan, variasi ukurannya dan jenis elemennya, pada dasarnya merupakan masalah dan *engineering judgement*. Elemen harus dibuat cukup kecil sehingga hasilnya menjadi lebih akurat, namun juga harus cukup besar agar mengurangi waktu komputasionalnya. Elemen-elemen yang kecil jika mungkin elemen dengan orde-tinggi) biasanya digunakan untuk kondisi geometri yang memiliki nilai perubahan tegangan yang drastis, seperti: area penegar, area sekat ruang muat, area *weather deck*, dll. Sedangkan elemen berukuran besar digunakan ditempat dimana besaran yang ingin dicari perubahannya relatif konstan.

Pemilihan jenis elemen yang digunakan dalam analisis metode elemen hingga tergantung pada kondisi fisik body dalam kondisi pembebanan yang sesungguhnya serta sejauh mana pendekatan terhadap kondisi yang sesungguhnya tersebut ingin dicapai. Sehingga keputusan pemodelan yang tepat secara satu, dua atau tiga dimensi sangat diperlukan. Dengan demikian pemilihan jenis elemen yang tepat untuk suatu persoalan tertentu merupakan salah satu langkah utama di dalam metode elemen hingga.

Jenis elemen garis dasar terdiri dari elemen bar (*truss*) dan elemen balok (*beam*). Elemen ini memiliki luasan penampang melintang, namun biasanya dinyatakan dalam bentuk segmen garis. Secara umum, luas penampang melintang elemen ini bisa bervariasi sepanjang elemennya ataupun konstan. Elemen ini kebanyakan digunakan untuk memodelkan struktur-struktur rangka batang (*truss*) atau *frame*. Elemen garis yang paling sederhana (elemen linier) memiliki dua titik simpul pada masing-masing ujungnya. Selain itu, terdapat pula elemen dengan orde yang lebih tinggi yaitu yang memiliki tiga simpul atau lebih (elemen kuadratik, kubik dll).

Elemen dua dimensi dasar atau elemen bidang mendapatkan beban gaya pada arah bidangnya (kondisi *plane stress* atau *plane strain*). elemen ini bisa berupa segitiga atau persegi empat elemen dua dimensi. Yang paling sederhana hanya memiliki simpul pada sudut-sudutnya (elemen linier) dengan batas sisi lurus. Terdapat juga elemen dua dimensi dengan orde yang lebih tinggi, misalnya pada elemen yang memiliki simpul-antara pada tiap sisinya (elemen kuadratik) dan elemen dengan sisi berbentuk lengkung. Ketebalan elemen ini dapat bersifat variatif maupun konstan.

Jenis yang lain adalah elemen tiga dimensi. Elemen tiga dimensi yang umum dipakai adalah berbentuk tetrahedral atau hexahedral (batu bata). Jenis elemen ini hanya dipakai jika di-inginkan analisis tegangan secara tiga dimensi. Elemen tiga dimensi yang paling dasar hanya memiliki simpul di titik-titik sudutnya dengan batas sisi lurus. Sementara itu untuk orde yang lebih tinggi, ditambah dengan simpul-antara (bisa juga simpul-antara pada permukaannya) dan memiliki permukaan sisi yang berbentuk lengkung.



Gambar II.4. Bentuk Elemen *Meshing* Permodelan Struktur

(Sumber: CFD Online, 2005)

Pada gambar II.4 dijelaskan bahwa pada mode tiga dimensi terdapat empat tipe pembentuk elemen, yaitu *tetrahedon* (limas segitiga), *pyramid* (limas segi empat), *triangular prism / wedge* (prisma segitiga), dan *Hexahedron* (prisma segi empat). Untuk bentuk geometri yang terstruktur, tipe elemen *hexagonal* lebih dianjurkan dikarenakan sistem akurasi perhitungan yang lebih baik dan jumlah elemen yang lebih sedikit.

Berdasarkan *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers (CSR-T) Appendix B*, pengaturan ukuran elemen diskrit sebisa mungkin dikondisikan mengikuti alur sistem penegar tiap panel kapal. Adapun beberapa syarat yang harus dipenuhi dalam permodelan *meshing* struktur adalah:

1. satu elemen diantara penegar memanjang dan tidak boleh lebih besar dari dua kali jarak penegar memanjang
2. satu elemen diantara penegar *vertical* pada sekat melintang dan tidak boleh lebih besar dari dua kali jarak penegar *vertical*
3. satu elemen diantara penegar pada *web frame*, *cross ties* dan *stringer*, dll.
4. tidak kurang dari tiga elemen pada tinggi *double bottom* dan wrang
5. ukuran *mesh web frame* pada *hopper tank* tetap dikondisikan *fine mesh* meskipun terdapat bukaan pada *web*

II.1.5. Teori kondisi batas pada pemodelan struktur

Kondisi batas merupakan batasan-batasan untuk menentukan bagaimana pemodelan struktur merepresentasikan simpul struktur pada kedudukannya secara praktis. Penentuan simpul pada kondisi batas akan sangat menentukan hasil perhitungan *finite elementt* karena berfungsi sebagai *transfer energy* antar komponen *rigid* ataupun lingkungan. Kondisi batas yang ideal adalah kondisi batas yang memenuhi keseimbangan dan kompatibilitas pada simpul struktur pada setiap elemen pada perletakan. Terdapat dua macam kondisi batas yang teridentifikasi pada pemodelan, yaitu (Utomo, 2008):

1. Kondisi batas Kinematik, yaitu kondisi batas yang berhubungan dengan kondisi kompatibilitas dan kondisi peralihan yang telah ditentukan. Kondisi batas jenis ini dikenal sebagai kondisi batas peralihan.
2. Kondisi batas mekanik, yaitu kondisi batas untuk memenuhi kondisi keseimbangan dan kondisi gaya termasuk momen yang telah ditentukan sehingga memenuhi kondisi batas struktur secara keseluruhan. Kondisi batas ini dikenal pula sebagai kondisi batas natural atau kondisi batas fisik atau kondisi batas gaya.

a. Kondisi kesetimbangan

Kondisi keseimbangan yaitu kondisi keseimbangan antara gaya-gaya dalam dan gaya-gaya luar baik pada simpul elemen maupun pada simpul struktur. Kondisi keseimbangan untuk kasus 2 dimensi harus memenuhi rumus kesetimbangan yang dapat dilihat pada Persamaan II.1 dan II.2.

$$\sum F_x = 0 \quad ; \quad \sum F_y = 0 \quad ; \quad \sum F_z = 0 \quad (II.1)$$

$$\sum F_{Mx} = 0 \quad ; \quad \sum F_{My} = 0 \quad ; \quad \sum F_{Mz} = 0 \quad (II.2)$$

b. Kondisi Kompatibilitas

Kondisi kompatibel ialah kondisi peralihan yang kontinyu dan mempunyai satu titik nilai untuk semua titik pada struktur. Sehingga struktur tetap stabil akibat pembebanan. Kompatibilitas pada suatu struktur yang dibagi-bagi menjadi beberapa elemen, harus memnuhi beberapa persyaratan:

1. Peralihan yang terjadi harus kontinyu dan pergerakannya halus.
2. Seluruh elemen struktur yang terangkai pada satu simpul harus tetap terangkai pada simpul yang sama.

Berdasarkan regulasi *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers (CSR-T) Appendix B*, kondisi batas pada pemodelan struktur Kapal Tanker diaplikasikan pada area ujung depan dan ujung belakang model. Proses perhitungan analisa *finite elementt* dilakukan dengan cara menentukan nilai pembebanan pada lokasi kondisi batas. Untuk perhitungan momen *bending* dapat diaplikasikan pada titik *independent point*, sedangkan perhitungan *shear* dapat diaplikasikan pada area ujung tumpuan *spring* pada model.

Tabel II.1. Penentuan Kondisi Batas Pemodelan
(Suaqwdxmber: Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers, 2015)

Location	Translation			Rotation		
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
Aft End						
Aft end (all longitudinal elements)	RL	-	-	-	RL	RL
Independent Point aft end, see Fig. B.2.13	Fix	-	-	-	M_{y-end}	M_{h-end}
Deck, inner bottom and outer shell	-	Springs	-	-	-	-
Side, inner skin and longitudinal bulkheads	-	-	Springs	-	-	-
Fore End						
Fore end (all longitudinal elements)	RL	-	-	-	RL	RL
Independent point fore end, see Fig. B.2.13	-	-	-	-	M_{y-end}	M_{h-end}
Deck, inner bottom and outer shell	-	Springs	-	-	-	-
Side, inner skin and longitudinal bulkheads	-	-	Springs	-	-	-

Berdasarkan Tabel II.1 dapat diketahui bahwa penentuan kondisi batas diaplikasikan pada area *fore end* dan *after end* pada permodelan struktur. Penentuan kondisi batas pada bagian *after end* adalah:

1. Pengaplikasian *Rigid Link* untuk perhitungan translasi sumbu x beserta rotasi pada sumbu y dan sumbu z
2. Penentuan *Independent point* untuk perhitungan *remote moment* pada sumbu y dan sumbu z dengan tumpuan fix pada arah sumbu x
3. Penentuan tumpuan pegas untuk perhitungan translasi sumbu y dan sumbu z

Sedangkan Penentuan kondisi batas pada bagian *fore end* adalah:

1. Pengaplikasian *Rigid Link* untuk perhitungan translasi sumbu x beserta rotasi pada sumbu y dan sumbu z
2. Penentuan *Independent point* untuk perhitungan *remote moment* pada sumbu y dan sumbu z
3. Penentuan tumpuan pegas untuk perhitungan translasi sumbu y dan sumbu z

II.1.6. Teori pembebanan pada pemodelan struktur

Suatu sistem struktur yang menanggung beban luar (*external forces*) akan menyebabkan timbulnya gaya dalam (*internal forces*) pada elemen-elemen penyusun struktur tersebut, yaitu berupa gaya dalam yang berfungsi untuk menahan beban yang bekerja sesuai dengan Hukum Newton III. Apabila gaya dalam semakin besar, maka tahanan dalam material yang digunakan untuk mencapai nilai maksimum akan bertambah. Namun jika penambahan beban masih terus dilanjutkan, maka akan terjadi kegagalan struktur. Batas maksimum kemampuan struktur untuk memberikan tahanan dengan tujuan melawan beban luar disebut sebagai kekuatan struktur. Kekuatan struktur berhubungan dengan efek internal (tekanan dan tekanan) dalam *solid body* atau struktur padat yang dapat terdeformasi karena beban eksternal (gaya, momen, torsi) yang bekerja padanya (Silva, 2014). Kekuatan struktur sangat dipengaruhi oleh beberapa kondisi, seperti: material, jenis pembebanan, sistem struktur, temperatur, dan lain sebagainya. Adapun jenis gaya reaksi yang terjadi akibat beban eksternal adalah tegangan dan regangan struktur.

Berdasarkan *Rule CSR-T Section 2*, kombinasi pembebanan eksternal pada analisa *Finite Element Method* (FEM) untuk merepresentasikan *scenario* kondisi pembebanan terdiri dari beban *local* dan *global*. Beban Lokal merupakan beban yang ditinjau pada suatu komponen panel tertentu, sedangkan beban global memperhitungkan model secara keseluruhan. Desain kombinasi pembebanan harus bervariasi secara akurat dan mampu untuk mencakup semua *scenario* pembebanan. Skenario pembebanan pada kapal terdiri dari:

1. Kombinasi Beban Statis (S)

Kombinasi beban yang merepresentasikan semua beban statis yang terjadi pada saat kapal mengalami posisi stagnan, seperti: pada saat kapal sedang singgah dipelabuhan, tes tanki, maupun pengoperasian sejenis.

2. Kombinasi Beban Statis dan Dinamis (S+D)

Kombinasi beban yang merepresentasikan semua pembebanan statis dan dinamis yang relevant pada saat kapal sedang beroperasi

3. Kombinasi Beban *Impact*

Kombinasi beban yang merepresentasikan beban *impact* (benturan) seperti *bottom slamming* dan *bow impact* yang terjadi akibat adanya benturan gelombang air laut dalam masa pengoperasian kapal.

4. Kombinasi Beban *Sloshing*

Kombinasi beban yang merepresentasikan beban *sloshing* (beban koyakan pada muatan) pada saat kapal sedang beroperasi

5. Beban *Fatigue*

Kombinasi Beban yang merepresentasikan beban dinamis kapal akibat adanya beban *cyclic* pada saat kapal sedang beroperasi

6. Kombinasi Beban *Accident* (A)

Kombinasi beban yang merepresentasikan adanya *accident* dimana dalam system analisa metode elemen hingga tidak melibatkan perhitungan pengoperasian kapal secara normal

Berdasarkan *Rule CSR-T Section 7*, skenario pembebanan dapat ditentukan melalui perhitungan parameter beban sebagai berikut:

1. Beban gelombang pada kapal

Beban Gelombang merupakan beban yang terjadi akibat adanya interaksi gelombang air laut terhadap badan kapal. Kondisi pembebanan tersebut terdiri dari dua jenis, yaitu:

a. *Hydrostatic Wave Pressure*

Beban gelombang hidrostatik (*Hydrostatic Wave Pressure*) merupakan beban gelombang yang terjadi akibat gaya apung (*buoyancy*) yang terjadi pada titik-titik badan kapal. Perhitungan beban gelombang hidrostatik dapat ditentukan melalui Persamaan II.3.

$$P_{hys} = \rho_{sw} g (T_{LC} - z) \quad (II.3)$$

b. Dynamic Wave Pressure

Beban gelombang kapal dinamis (*Dynamic Wave Pressure*) merupakan beban yang terjadi akibat pergerakan fluktuatif gelombang air laut pada saat kapal sedang berlayar (*seagoing operation*). Beban gelombang tersebut menekan badan kapal baik dari arah vertikal, memanjang, maupun melintang kapal. Perhitungan beban gelombang dinamis dapat ditentukan melalui Persamaan II.4 dan II.5.

$$P_1 = 2 f_{prob} f_{n1-P1} \left(P_{11} + \frac{135 B_{local}}{4(B+75)} - 1.2(T_{LC} - z) f_1 + \frac{135 B_{local}}{4(B+75)} f_2 \right) \quad (II.4)$$

$$P_2 = 26 f_{prob} f_{n1-P2} \left[\left(\frac{B_{Local}}{8} \theta + f_t C_b \frac{0.25 B_{local} + 0.8 C_{wv}}{14} \left(0.7 + \frac{2z}{T_{LC}} \right) \right) f_1 + \left(\frac{B_{Local}}{8} \theta + f_t C_b \frac{0.25 B_{local}}{14} \left(0.7 + \frac{2z}{T_{LC}} \right) \right) f_2 \right] \quad (II.5)$$

Adapun parameter persamaan beban gelombang dinamis dapat dihitung melalui Persamaan II.6 hingga II.17.

$$P_{11} = (3f_s + 0.8)C_{wv} \quad (II.6)$$

$$\theta = \frac{50}{B+75} (1.25 - 0.025U_{roll})f_{bk} \quad (II.7)$$

$$f_1 = f_{lng} - \frac{f_{lng}}{f_v} f_2 + f_2 \quad (II.8)$$

$$f_2 = 0.25 f_v \left(\frac{4|y|}{B_{local}} - 1 \right) \quad \text{untuk } |y| < 0.25 B_{local} \quad (II.9)$$

$$= \left(\frac{4|y|}{B_{local}} - 1 \right) \quad \text{untuk } |y| \geq 0.25 B_{local} \quad (II.10)$$

$$f_T = T_{LC}/T_{SC} \quad (II.11)$$

$$f_s = C_b + \frac{1.33}{\sqrt{C_b}} \quad \text{untuk area berada atau dibelakang A.P.} \quad (II.12)$$

$$= C_b \quad \text{untuk } 0.2L_{CSR-T} \text{ sampai } 0.7L_{CSR-T} \text{ dari A.P.} \quad (II.13)$$

$$= C_b + \frac{1.33}{\sqrt{C_b}} \quad \text{untuk area berada atau didepan F.P.} \quad (II.14)$$

$$f_{lng} = 1.0 \quad \text{untuk area berada atau dibelakang A.P.} \quad (II.15)$$

$$= 0.7 \quad \text{untuk } 0.2L_{CSR-T} \text{ sampai } 0.7L_{CSR-T} \text{ dari A.P.} \quad (II.16)$$

$$= 1.0 \quad \text{untuk area berada atau didepan F.P.} \quad (II.17)$$

2. Beban muatan pada kapal

Beban muatan merupakan beban yang terjadi akibat interaksi beban muatan terhadap badan kapal *tanker*. Beban muatan terdiri dari dua jenis, yaitu:

a. Beban tanki hidrostatik

Beban tanki hidrostatik (*hydrostatic tank pressure*) merupakan beban kapal yang terjadi akibat gaya berat muatan fluida yang melawan badan kapal *tanker*. Perhitungan beban tanki dinamis dapat ditentukan melalui Persamaan II.18.

$$P_{in-tk} = \rho g z_{tk} \quad (\text{II.18})$$

b. Beban tanki dinamis

Beban tanki dinamis (*dynamic tank pressure*) merupakan beban kapal yang terjadi akibat tekanan fluida muatan yang berfluktuasi. Perhitungan beban tanki dinamis dapat ditentukan dengan menganalisis nilai beban tanki dinamis pada arah vertikal, melintang, dan memanjang yang dapat dihitung melalui Persamaan II.19 hingga II.21.

$$P_{in-v} = \rho \alpha_v (z_0 - z) \quad (\text{II.19})$$

$$P_{in-t} = \rho \alpha_t (y_0 - y) \quad (\text{II.20})$$

$$P_{in-lng} = \rho \alpha_{lng} (x_0 - x) \quad (\text{II.21})$$

Adapun konstanta persamaan beban tanki dinamis dapat dihitung melalui Persamaan II.22 hingga II.51.

$$a_0 = (1.58 - 0.47 C_b) \left(\frac{2.4}{\sqrt{L_{CSR-T}}} + \frac{34}{L_{CSR-T}} - \frac{600}{L_{CSR-T}^2} \right) \quad (\text{II.22})$$

$$a_v = f_{prob} \sqrt{a_{heave}^2 + a_{pitch-z}^2 + a_{roll-z}^2} \quad (\text{II.23})$$

$$a_t = f_{prob} \sqrt{a_{sway}^2 + (g \sin \theta + a_{roll-y})^2} \quad (\text{II.24})$$

$$a_{lng} = 0.7 f_{prob} \sqrt{a_{surge}^2 + \left(\frac{L_{CSR-T}}{325} (g \sin \theta + a_{pitch-x}) \right)^2} \quad (\text{II.25})$$

$$a_{heave} = f_v a_0 g \quad (\text{II.26})$$

$$a_{sway} = 0.3 g a_0 \quad (\text{II.27})$$

$$a_{surge} = 0.2 g a_0 \quad (\text{II.28})$$

$$a_{pitch-z} = \left(0.3 + \frac{L_{CSR-T}}{325}\right) \varphi \left(\frac{2\pi}{U_{pitch}}\right)^2 |x - 0.45 L_{CSR-T}| \quad (II.29)$$

$$a_{roll-z} = 1.2\theta \left(\frac{2\pi}{U_{roll}}\right)^2 |y| \quad (II.30)$$

$$a_{roll-y} = \theta \left(\frac{2\pi}{U_{roll}}\right)^2 R_{roll} \quad (II.31)$$

$$a_{pitch-x} = f_v \phi \left(2\pi/U_{pitch}\right)^2 R_{pitch} \quad (II.32)$$

$$R_{roll} = z - (D/4 + T_{LC}/2) \text{ atau } z - (D/2) \quad (II.33)$$

$$R_{pitch} = z - (D/4 + T_{LC}/2) \text{ atau } z - (D/2) \quad (II.34)$$

$$U_{roll} = 2.30r_{roll-gyr}/\sqrt{GM} \quad (II.35)$$

$$U_{pitch} = f_v 0.6 \left(\frac{2\pi}{g}\right) (1 + f_t) L_{CSR-T} \quad (II.36)$$

$$\theta = \frac{50}{B+75} (1.25 - 0.025U_{roll}) f_{bk} \quad (II.37)$$

$$\varphi = 960 \frac{V_1}{C_b} \frac{1}{L_{CSR-T}} \frac{\pi}{180} \quad (II.38)$$

$$T_{LC} = 0.9T_{sc} \quad \text{untuk sarat muatan penuh} \quad (II.39)$$

$$= 0.6T_{sc} \quad \text{untuk sarat muatan tereduksi} \quad (II.40)$$

$$= T_{bal} \quad \text{untuk kondisi ballast} \quad (II.41)$$

$$GM = 0.12 B \quad \text{untuk sarat muatan penuh} \quad (II.42)$$

$$= 0.24 B \quad \text{untuk sarat muatan tereduksi} \quad (II.43)$$

$$= 0.33 B \quad \text{untuk kondisi ballast} \quad (II.44)$$

$$r_{rol-gyr} = 0.35 B \quad \text{untuk sarat muatan penuh} \quad (II.45)$$

$$= 0.40 B \quad \text{untuk sarat muatan tereduksi} \quad (II.46)$$

$$= 0.45 B \quad \text{untuk kondisi ballast} \quad (II.47)$$

$$f_{prob} = 1 \quad \text{untuk perhitungan kekuatan struktur} \quad (II.48)$$

$$= 0.5 \quad \text{untuk perhitungan kelelahan struktur} \quad (II.49)$$

$$f_v = (C_{b-LC}/C_b)^2 (1.2 - L_{CSR-T}/1000) \quad (II.50)$$

$$f_T = T_{LC} / T_{sc} \quad (II.51)$$

3. Beban momen lentur

Menurut Beer (1984), momen lentur (*bending moment*) adalah reaksi yang terjadi pada elemen struktur ketika gaya eksternal atau momen diterapkan pada elemen, sehingga menyebabkan elemen menekuk. Pengaruh *bending moment* terhadap kapal akan cenderung membengkokkan sepanjang badan kapal. Bilamana gaya *buoyancy* yang bekerja pada bagian tengah kapal lebih besar daripada gaya beratnya, maka kapal akan melengkung keatas atau disebut sebagai *Hogging*. Sedangkan apabila gaya berat pada bagian tengah lebih besar daripada gaya *buoyancy*, maka kapal melengkung kebawah atau disebut *Sagging*. Hal tersebut menunjukkan bahwa terjadi perbedaan konsentrasi berat muatan antara bagian ujung kapal dengan area bagian tengah. Perhitungan *bending moment* pada saat menghasilkan defleksi kearah sumbu y (*vertical*) atau saat kondisi *hogging* dan *sagging* dapat ditentukan dengan Persamaan II.52 dan II.53.

$$M_{wv-hog} = f_{prob} 0.19 f_{wv-v} C_{wv} L_{CSR-T}^2 B C_b \quad (II.52)$$

$$M_{wv-sag} = -f_{prob} 0.11 f_{wv-v} C_{wv} L_{CSR-T}^2 B (C_b + 0.7) \quad (II.53)$$

Sedangkan perhitungan *bending moment* pada saat menghasilkan defleksi kearah sumbu z (*horizontal*) dapat ditentukan melalui Persamaan II.54.

$$M_{wv-h} = f_{prob} \left(0.3 + \frac{L_{CSR-T}}{2000} \right) f_{wv-h} C_{wv} L_{CSR-T}^2 T_{LC} C_b \quad (II.54)$$

Adapun konstanta persamaan *vertical and horizontal bending moment* dapat dihitung melalui Persamaan II.55 hingga II.62.

$$C_{wv} = 10.75 - \left(\frac{300 - L_{CSR-T}}{100} \right)^{1.5} \quad 150 \leq L_{CSR-T} \leq 300 \quad (II.55)$$

$$C_{wv} = 10.75 \quad 300 < L_{CSR-T} \leq 350 \quad (II.56)$$

$$C_{wv} = 10.75 - \left(\frac{300 - L_{CSR-T}}{100} \right)^{1.5} \quad 350 < L_{CSR-T} \leq 500 \quad (II.57)$$

$$f_{wv-v-h} = 0 \quad \text{untuk area A.P.} \quad (II.58)$$

$$= 0.1 \quad \text{untuk area } 0.4 L_{CSR-T} \text{ hingga } 0.65 L_{CSR-T} \quad (II.59)$$

$$= 1.0 \quad \text{untuk area F.P.} \quad (II.60)$$

$$f_{prob} = 0.5 \quad \text{untuk perhitungan } fatigue \quad (II.61)$$

$$= 1 \quad \text{untuk perhitungan kekuatan} \quad (II.62)$$

Beban *fatigue* pada kapal merupakan kombinasi Beban yang merepresentasikan beban dinamis kapal akibat adanya beban *cyclic* pada saat kapal sedang beroperasi (*seagoing operation*). Berdasarkan Regulasi CSR-T Appendix C, parameter skenario pembebanan yang diaplikasikan untuk perhitungan *fatigue* pada model elemen hingga ialah beban gelombang dinamis, beban tanki dinamis, beban *vertical bending moment*, dan beban *horizontal bending moment*. Oleh karena itu semua perhitungan beban pada persamaan tersebut harus dikonversi menjadi beban *amplitude*, yaitu:

1. Beban amplitudo gelombang dinamis

Beban amplitudo gelombang dinamis (*dynamic wave pressure amplitude*) merupakan beban siklis yang terjadi akibat pergerakan gelombang terhadap badan kapal secara kontinyu. Perhitungan beban amplitudo gelombang dinamis dapat dihitung melalui Persamaan II.63 hingga II.65.

$$P_{ex-amp} = 0 \quad \text{untuk } z \geq T_{LC} + h_{WL} \text{ atau D} \quad (\text{II.63})$$

$$P_{ex-amp} = 0.5 P_{WL} \quad \text{untuk posisi } still \text{ waterline} \quad (\text{II.64})$$

$$P_{ex-amp} = P_{ex-dyn} \quad \text{untuk } z \leq T_{LC} - h_{WL} \text{ atau D} \quad (\text{II.65})$$

Adapun parameter persamaan beban amplitudo gelombang dinamis dapat dihitung melalui Persamaan II.66 dan II.67.

$$P_{WL} = P_1 \text{ or } P_2 \quad \text{diambil nilai } P_1 \text{ atau } P_2 \text{ yang terbesar} \quad (\text{II.66})$$

$$P_{ex-dyn} = P_1 \text{ or } P_2 \quad \text{dimana } f_{prob}=1, f_{n1-P1}=0.9, f_{n1-P2}=0.65, f_v = 1 \\ \text{diambil nilai } P_1 \text{ atau } P_2 \text{ yang terbesar} \quad (\text{II.67})$$

2. Beban *amplitude* tanki dinamis

Beban amplitudo tanki dinamis (*dynamic tank pressure amplitude*) merupakan beban siklis yang terjadi akibat pergerakan muatan fluida terhadap badan kapal secara kontinyu. Perhitungan beban amplitudo tanki dinamis dapat dihitung melalui Persamaan II.68.

$$P_{in-amp} = f_v |P_{in-v-tk1} - P_{in-v-tk2}| + f_t |P_{ull-t-tk1} P_{in-t-tk1} + P_{ull-t-tk2} P_{in-t-tk2}| \\ P_{in-amp} = +f_{lng} |P_{ull-lng-tk1} P_{in-lng-tk1} + P_{ull-lng-tk2} P_{in-lng-tk2}| \quad (\text{II.68})$$

Untuk perhitungan area tanki ruang muat, nilai konstanta f_v , f_t , dan f_{lng} masing-masing sebesar 0.9, 0.4, dan 0.4. Sedangkan untuk area tanki *ballast*, nilai tersebut masing-masing sebesar 0.9, 0.6, dan 0.4.

3. Beban Amplitudo momen lentur

Beban amplitudo momen lentur (*bending moment amplitude*) merupakan beban siklis yang terjadi akibat distribusi beban yang mengakibatkan defleksi kearah *vertical* maupun *horizontal* secara kontinyu. Perhitungan beban amplitudo tanki dinamis dapat dihitung melalui Persamaan II.69 dan II.70.

$$M_{wv-v-amp} = 0.5(M_{wv-hog} - M_{wv-sag}) \quad (II.69)$$

$$M_{wv-h-amp} = M_{wv-h} \quad (II.70)$$

II.1.7. Teori Tegangan normal

Tegangan adalah gaya yang bekerja dalam luasan yang kecil tak hingga pada sebuah potongan dan terdiri dari berbagai macam besaran dan arah (Popov, 1978). Gaya-gaya tersebut merupakan besaran *vector* alam yang melakukan reaksi keseimbangan terhadap gaya-gaya luar. Pada umumnya intensitas gaya yang bekerja pada luasan kecil tak terhingga berubah - ubah dari suatu titik ke titik yang lain. Dengan kata lain, sifat umum intensitas gaya cenderung mengarah miring terhadap bidang potongan. Dalam praktek mekanika teknik, intensitas gaya biasanya diuraikan menjadi tegak lurus dan sejajar terhadap bidang irisan. Intensitas gaya yang tegak lurus atau normal terhadap irisan tersebut disebut sebagai tegangan normal (*normal stress*), dimana sering dilambangkan dalam bentuk σ (*sigma*). Tegangan dapat ditransformasi dari satu set sumbu koordinat ke set sumbu koordinat lainnya. Dengan transformasi pula dapat dicari suatu set sumbu koordinat pada suatu titik yang memberikan tegangan utama dari kondisi tegangan yang telah diketahui di titik itu. Tegangan normal dan geser pada bidang dinyatakan dalam bentuk σ dan τ melalui sketsa segitiga dari perhitungan normal melalui Persamaan II.71 hingga II.73.

$$\sigma_{x'x'} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (II.71)$$

$$\sigma_{y'y'} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} - \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (II.72)$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (II.73)$$

Menurut Hall (1969), tegangan utama (*principal stress*) adalah tegangan normal yang terjadi pada suatu set sumbu koordinat baru setelah transformasi yang menghasilkan tegangan geser nol. Tegangan tersebut memiliki beberapa nilai sudut θ yang memberikan nilai tegangan tegangan σ_x , σ_y , dan τ_{xy} . Tegangan-tegangan tersebut ditunjukkan melalui Persamaan II.74.

$$(\sigma_1, \sigma_2)_{\max \text{ or } \min} = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (II.74)$$

II.1.8. Teori Mekanika Kelelahan struktur

Menurut Suresh (1998), kelelahan (*Fatigue*) adalah salah satu jenis kegagalan struktur pada komponen akibat beban yang berulang-ulang (beban siklik). Diperkirakan 50%-90% kegagalan mekanis disebabkan oleh kelelahan. Kelelahan terjadi karena tiga faktor dasar, yaitu: tegangan tarik maksimum yang cukup tinggi, variasi atau flutuasi tegangan yang cukup besar, dan siklus penerapan tegangan yang cukup besar. Selain tiga faktor tersebut, terdapat pula parameter global lain, yaitu: konsentrasi tegangan, korosi, suhu, kelebihan bahan, dll.

Menurut Bazant (1992), karakteristik kelelahan logam dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu karakteristik makro dan karakteristik mikro. Karakteristik makro merupakan ciri-ciri kelelahan yang dapat diamati secara visual (dengan mata telanjang atau dengan kaca pembesar). Hal tersebut dapat dilihat melalui munculnya *ratchet marks* dan *beach marks* pada material. Pada prosesnya, retak menjalar menuju kearah ketebalan melalui garis-garis *beach mark* yang berbentuk *circullar*. Garis-garis tersebut akan tumbuh seiring dengan arah perambatan retak dengan mengikuti bentuk *contour* dari retak. Jika dibiarkan secara terus menerus, maka perambatan retak akan semakin cepat sehingga menjadi patah. Sedangkan karakteristik struktur mikro hanya dapat diamati dengan menggunakan mikroskop.

Jika kelelahan terjadi secara terus menerus, maka struktur dapat menjadi patah. Menurut Rajendra (2004), perpatahan (*Fracture*) adalah pemisahan atau pemecahan suatu benda padat menjadi 2 bagian atau lebih. Proses perpatahan terdiri atas 3 tahapan, yaitu timbulnya retak (Inisiasi Keretakan), penjalaran retak, dan *final fracture*. Tahap awal mulainya retak adalah *slip* pada beberapa butir yang terus menjalar. Tahap awal pembentukan retak ini memerlukan jumlah siklus yang cukup besar. Perambatan retak yang terjadi pada tahap ini sangat lambat, yaitu diawali oleh adanya striasi dari tempat awal mulainya slip antar butir.

Menurut Liu (2005), *final fracture* adalah proses akhir kerusakan pada struktur pada saat mengalami pembebanan. Ketika terjadi penjalaran retak, penampang pada bagian tersebut akan berkurang, yaitu sampai pada kondisi dimana penampang tidak mampu lagi menahan beban yang terakhir kalinya. Pada tahap ini penjalaran retak yang terjadi sangat cepat sehingga struktur akan patah menjadi dua. Patah dapat digolongkan menjadi 2 kategori umum, yakni patah liat dan patah getas. Patah liat ditandai oleh adanya deformasi plastik yang cukup besar, yaitu sebelum dan selama proses penjalaran retak. Patah getas pada logam ditandai oleh adanya kecepatan penjalaran retak yang tinggi, tanpa terjadi deformasi kasar dan sedikit sekali terjadi deformasi mikro.

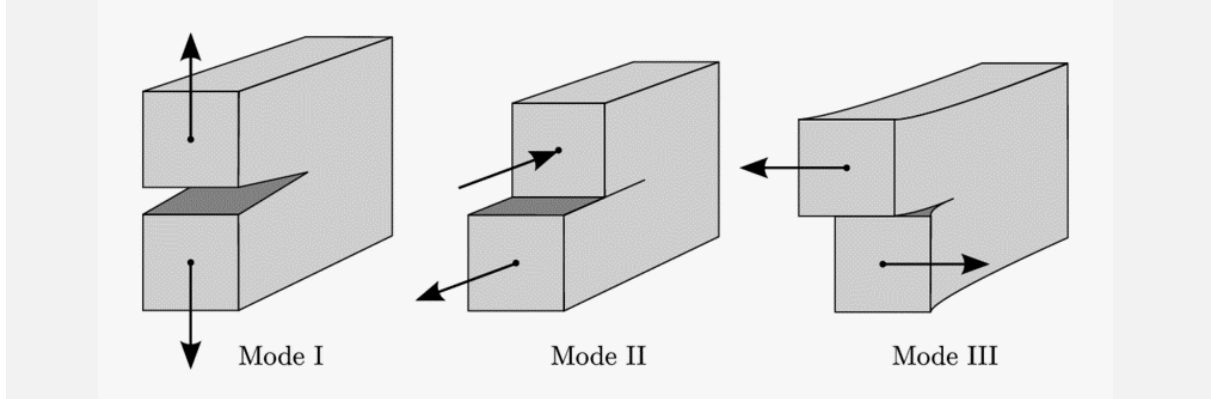
II.1.9. Teori Penjalaran Retak

Penjalaran retak *fatigue* merupakan suatu keadaan dimana retak mengalami perambatan akibat adanya beban siklis yang terjadi dalam jangka waktu tertentu. Penjalaran retak tersebut terjadi setelah proses inisiasi keretakan dan sebelum terjadinya *final fracture*. Dalam perhitungan *fatigue*, analisa umur kelelahan konstruksi dapat ditentukan melalui periode terjadinya inisiasi retak hingga menjalar menuju *final fracture*. Menurut Gupta (1986), pada kenyataannya, komponen-komponen struktur yang menggunakan sambungan las pasti akan memiliki retak inisial pada ujung sambungan las yang terbentuk selama proses pendinginan las. Sehingga dalam analisis *fatigue*, para ahli tidak lagi memperhitungkan tahap pembentukan retak inisial, tetapi langsung menuju pada tahap penjalaran retak.

Dalam menganalisis fenomena penjalaran retak, maka perlu dikaji terlebih dahulu mengenai salah satu parameter perhitungan *fracture mechanics*, yaitu faktor intensitas tegangan (*stress intensity factor*) atau K. Menurut Newman (1984), faktor intensitas tegangan merupakan ukuran suatu bahan cacat terhadap laju terjadinya perpatahan. Bila suatu bahan retak mendapatkan beban tegangan *uniform*, maka pasti akan terjadi pemusatan tegangan pada area ujung retak, sehingga menyebabkan terjadinya deformasi lokal pada area tersebut. Melalui deformasi lokal tersebut, maka akan dapat diketahui pengaruh suatu konfigurasi retak terhadap dimensi retak dan beban *uniform*. Semakin panjang ukuran retak dan semakin tinggi beban *uniform*, maka semakin tinggi pula konsentrasi tegangan yang akan terjadi. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin besar harga K, maka retak tersebut akan semakin mudah merambat. Dengan adanya permasalahan tersebut, maka fenomena keretakan struktur tentu akan mengakibatkan berkurangnya kekuatan system konstruksi, sehingga nilai kekuatan bahan menjadi lebih rendah daripada rencana desain awal. Kekuatan sisa struktur akan berkurang secara progresif dengan bertambahnya ukuran retak.

Faktor intensitas tegangan sangat dipengaruhi pula oleh faktor geometri β . Retakan dapat terjadi pada area tengah (*centered*), ujung (*edge*), kedalaman (*Penny-shaped*), maupun posisi miring terhadap luasan tengah bidang (*Slanted*) geometri struktur. Untuk kasus-kasus sederhana, harga faktor geometri β sudah banyak dianalisis dan hasilnya dimuat dalam bentuk *handbook*. Dalam penelitian tersebut, harga faktor geometri untuk berbagai kasus dapat ditemukan, akan tetapi tidak diperlihatkan pengaruh ketebalan terhadap besarnya nilai K. Pada penelitian yang lebih mutakhir, Sun C.T dan Kwon S.W (2000) menjelaskan bahwa harga K berubah seiring dengan arah ketebalan pelat.

Bila suatu konstruksi retak mendapatkan suatu tegangan, maka pada bagian ujung retak akan terjadi keadaan deformasi lokal. Perambatan retak dalam suatu benda solid dapat dinyatakan dalam bentuk tiga mode pembebanan seperti yang terlihat pada Gambar II.5.



Gambar II.5. Tiga Mode Pembebanan saat Proses Penjalaran Retak

(Sumber: Krammer, 2014)

Gambar II.5 menjelaskan bahwa *stress intensitas factor* terdiri dari tiga deformasi retak, yaitu: Mode I, Mode II, dan Mode III. Mode I atau *opening* terjadi pada saat *tension load* tegak lurus terhadap arah pertumbuhan retak. Mode II atau *sliding* merupakan beban paralel dengan permukaan retak ke arah lebar material, sehingga mengakibatkan *shear loading* di seluruh permukaan retak dan tegak lurus terhadap ujung retak. Mode III atau *tearing* merupakan beban paralel dengan permukaan retak ke arah tebal material, sehingga mengakibatkan *shear loading* melintasi celah permukaan dan sejajar dengan ujung retak. Dari tiga mode deformasi retak yang terjadi, mode deformasi I merupakan jenis mode retak yang sangat dominan terjadi selama proses propagasi retak (Fortsyth, 1962). Oleh karena itu perlu dilakukan solusi berupa deret tak hingga untuk medan tegangan di sekitar *crack tip* untuk skenario mode I.

Untuk mengevaluasi faktor intensitas tegangan dapat dilakukan pendekatan dengan menghubungkan solusi analitik tegangan dengan perpindahan pada ujung retak. Hal ini memerlukan prosedur ekstrapolasi untuk mendapatkan faktor intensitas tegangan pada ujung retak. Variasi perpindahan secara analitis di area sekitar ujung retak dapat didefinisikan melalui Persamaan II.75 hingga II.77.

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}(r, 0) \quad (\text{II.75})$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yx}(r, 0) \quad (\text{II.76})$$

$$K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{yz}(r, 0) \quad (\text{II.77})$$

Berdasarkan Persamaan II.75, untuk menentukan nilai faktor intensitas tegangan Mode I terhadap struktur terhingga, maka perhitungan K terhadap struktur geometri bahan dapat dikonversi melalui Persamaan II.78 (Liu, 2005).

$$\Delta K = \beta \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (\text{II.78})$$

Karena β merupakan fungsi geometri pada retakan dan $\Delta \sigma$ sebagai rentang tegangan akibat pembebanan siklis, maka untuk model retak *semi-elliptical surface crack* dengan arah perambatan retak menuju kearah ketebalan, nilai β dapat ditranformasikan menjadi Persamaan II.79. (Ochsner, 2016)

$$\Delta K = \frac{(1-0.025 (a/b)^2 + 0.06 (a/b)^4)}{\sqrt{\cos(\pi a/2b)}} \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (\text{II.79})$$

Dalam Analisa perhitungan mekanika kepecahan (*fracture mechanics*), faktor intensitas tegangan merupakan fungsi dari laju perambatan retak (*crack propagation rate*). Retak berawal dari daerah yang memiliki intensitas tegangan yang paling tinggi kemudian berkembang seiring dengan berjalannya siklus pembebanan. Didalam suatu percobaan, Analisa laju perambatan retak dapat diukur secara visual dengan alat teleskop, alat ultrasonik, maupun alat pengubah resistivitas listrik. Jumlah total siklus yang menyebabkan kegagalan *fracture* merupakan penjumlahan jumlah siklus yang menyebabkan retakan awal dari fase perambatannya. Menurut Newman dan Piascik (2000), Fase perambatan retak terdiri dari tiga tahapan sebagai berikut:

1. Stage I, yaitu tahap yang dibatasi oleh nilai *threshold* dimana laju perambatan retak terjadi mulai dari asimtot menuju nol seiring dengan K mendekati K_{th} . Di bawah K_{th} , retak merambat dengan laju rambat retak yang tidak dapat ditentukan dengan eksperimen.
2. Stage II, yaitu tahapan dimana terjadi perambatan retak yang stabil yang dapat digambarkan dengan hubungan linear antara $\log da/dN$ dan $\log \Delta K$.
3. Stage III, yaitu tahapan akhir penjaralan retak hingga material mengalami *fracture*. Ketika terjadi penjaralan retak, penampang pada bagian material tersebut akan berkurang sampai pada kondisi dimana penampang tidak mampu menahan beban yang terakhir kalinya. Pada tahap ini penjaralan retak yang terjadi sangat cepat sehingga struktur akan pecah menjadi dua. Penjaralan yang cepat tersebut sering disebut *fast fracture*.

Dari konsep *fracture mechanics* tersebut, laju perambatan retak dapat dinyatakan dengan variable da/dN yang merupakan fungsi dari sifat material, panjang retak, dan tegangan operasi melalui Hukum P.C. Paris dan Erdogan melalui Persamaan II.80. (Broek,1987)

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (\text{II.80})$$

Hasil perhitungan perambatan retak umumnya ditunjukkan sebagai umur kelelahan dari struktur yang ditinjau. Dengan memberikan masukan berupa besar retak awal dan retak akhir, maka akan diketahui jumlah batas siklus yang masih aman dengan mengintegrasikan persamaan laju keretakan melalui Persamaan II.81

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C (\Delta K)^m} \quad (\text{II.81})$$

II.1.10. Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method* - FEM) merupakan prosedur numeris yang dipakai secara luas untuk menyelesaikan persamaan diferensial dari problema fisika atau *engineering* yang berbasis kekomputeran. Dalam penyelesaian masalah, metode elemen hingga menggunakan pendekatan diskretisasi elemen untuk menemukan perpindahan titik simpul / *Joint / grid* dan gaya-gaya dari struktur. Persamaan yang menggunakan elemen diskret mengacu pada metode matrik untuk analisis struktur. Diskretisasi yang dilakukan dapat dilakukan dengan menggunakan elemen satu dimensi (elemen garis), dua dimensi (elemen bidang), ataupun tiga dimensi (elemen solid / kontinum). Pendekatan dengan menggunakan elemen kontinum adalah tipe pendekatan penyelesaian yang memiliki hasil lebih mendekati sebenarnya. Metode elemen hingga dapat digunakan dengan melakukan langkah- langkah sebagai berikut: (Chandrakant,1979)

1. Diskritisasi dan memilih konfigurasi elemen. Langkah ini menyangkut pembagian benda menjadi sejumlah benda kecil terstruktur yang biasa disebut sebagai elemen-elemen hingga.
2. Memilih model atau fungsi pendekatan. Dalam langkah ini dipilih suatu pola atau bentuk untuk distribusi besaran yang tidak diketahui yang dapat berupa suatu perpindahan dan/atau tegangan untuk persoalan-persoalan tegangan-deformasi.
3. Menentukan hubungan regangan – perpindahan dan tegangan-regangan. Hukum tegangan-regangan digunakan dalam analisis ini.
4. Menurunkan persamaan-persamaan elemen. Penurunan persamaan elemen dapat menggunakan metode energi dan metode residu berbobot.
5. Perakitan persamaan elemen untuk mendapatkan persamaan global atau persamaan rakitan dan mengenal syarat batas. Proses perakitan didasarkan pada hukum kekontinuan. Persamaan elemen yang diperoleh dijumlahkan untuk memperoleh persamaan global.

6. Memecahkan besaran-besaran primer yang tak diketahui
7. Memecahkan besaran-besaran penurunan atau sekunder
8. Interpretasi hasil-hasil

Di era komputerisasi seperti sekarang ini, telah banyak dikembangkan *software* berbasis metode elemen hingga yang dapat digunakan dengan cukup mudah. Adapun *software* yang dimaksud antara lain *software* Adina, midas NFX, ANSYS, dan lain – lain. Diharapkan dengan adanya *software* tersebut, permasalahan pemodelan suatu elemen struktur dengan metode elemen hingga dapat diselesaikan dengan mudah dan cepat.

II.2. Tinjauan Pustaka

Dalam melaksanakan penelitian mengenai analisa penjararan retak sekat ruang muat Kapal Tanker 17500 DWT, maka perlu diketahui terlebih dahulu kasus-kasus terdahulu yang dianggap relevan dengan topik penelitian untuk menguji validitas dan sebagai referensi dalam melaksanakan perhitungan analisis. Adapun beberapa contoh kasus yang memiliki keterkaitan dengan penelitian ini adalah:

1. Analisa umur kelelahan *bottom plate* FPSO

Khusnul Abdi (2010) dengan judul penelitiannya yaitu “Analisa Umur Kelelahan pada *bottom plate* FPSO dengan Metode *Elastic Plastic fracture Mechanics* Berbasis Keandalan” menyatakan bahwa penjararan retak pada struktur material selalu berkaitan erat dengan nilai faktor intensitas tegangan maupun J-Integral.

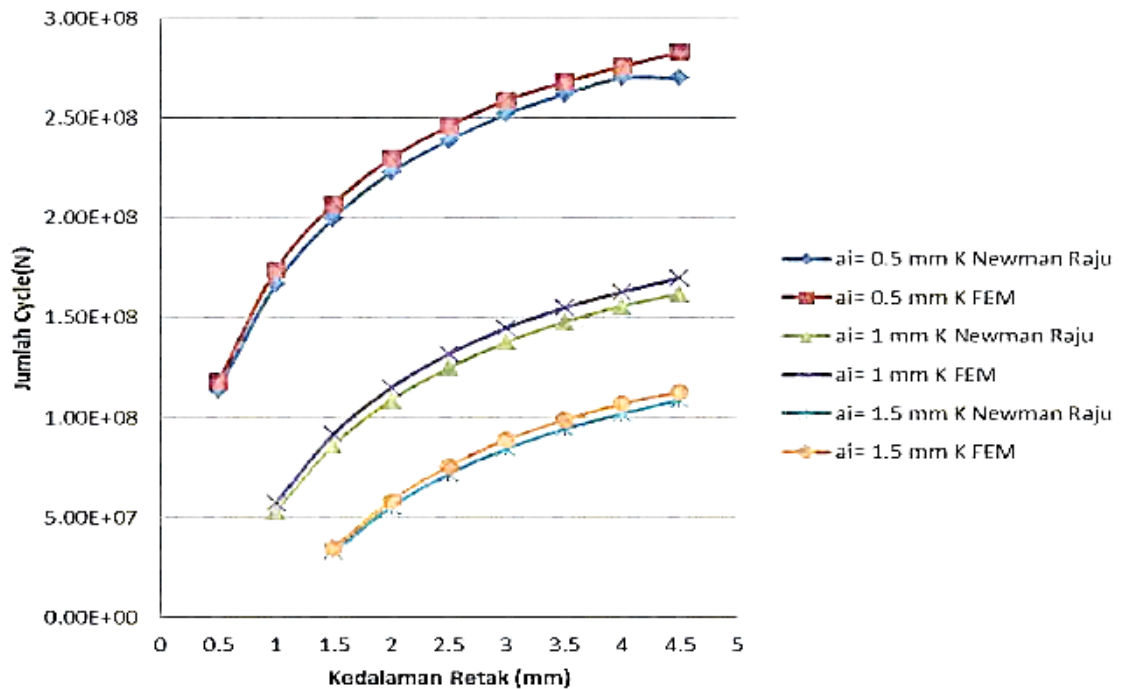
Tabel II.2. Umur Kelelahan pada Material akibat Kegagalan *Fatigue*
(Abdi, 2010)

a_0 (m)	a_f (m)	N (cycle)	Gelombang 10 tahun (cycle)	Umur kelelahan (tahun)
0.0005	0.00204	7.29E+07	1.93E+07	37.767
0.001	0.00204	4.36E+07	1.93E+07	22.614
0.0015	0.00204	1.75E+07	1.93E+07	9.067

Tabel II.2 menjelaskan bahwa pada saat inisiasi retak berukuran 0.5 mm, maka umur kelelahan struktur adalah 38 tahun, sedangkan pada pertambahan kedalaman retak berikutnya untuk ukuran 1 mm dan 1.5 mm, maka secara berturut-turut umur kelelahan struktur kapal menjadi 23 dan 9 tahun. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin dalam retak, maka semakin kecil umur kelelahan pada struktur material.

2. Analisa perkiraan umur *crossdeck* kapal ikan

Erik Sugianto (2012) dengan judul penelitiannya yaitu “Analisa Perkiraan Umur pada *Cross Deck* Kapal Ikan Katamaran 10 GT Menggunakan Metode *Fracture Mechanics* Berbasis Metode Elemen Hingga” melakukan analisa dengan menghasilkan kesimpulan yang dapat dilihat pada Gambar II.12.



Gambar II.6. Perbandingan N dan a untuk Variasi a_i Sebesar 0.5 mm, 1 mm, dan 1.5 mm
(Sugianto, 2012)

Gambar II.6 menunjukkan bahwa semakin dalam retak maka jumlah *cycle* akan semakin tinggi. Perbedaan jumlah *cycle* yang dihasilkan oleh K Newman Raju dengan K dari metode elemen hingga juga tidak terlalu jauh, hanya berbeda sedikit. Ini dikarenakan SIF yang menjadi input utama perhitungan *cycle* antar keduanya berbeda. Seperti pada kedalaman retak 3 mm, jumlah *cycle* antara kedua SIF tersebut berada pada kisaran angka 2.50×10^8 , namun tidak menyentuh 3×10^8 . Setelah menentukan nilai *cycle* tersebut, maka proses selanjutnya adalah menentukan nilai *fatigue life* material. Untuk kedalaman awal (a_o) bernilai 0.5 mm, maka konstruksi *cross deck* memiliki umur 16.14892886 tahun. Sedangkan dengan a_o bernilai 1 mm, konstruksi tersebut berumur 9.692809685 tahun. Dan apabila a_o lebih dalam yakni bernilai 1.5 mm, maka umur konstruksinya menjadi 6.484139307 tahun. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin dalam ukuran retak material, maka nilai *fatigue life* suatu struktur akan semakin rendah.

3. Analisa perambatan retak poros kapal

Taufiq Estu Raharjo (2012) melaksanakan penelitian mengenai “Analisa Perambatan Retak pada Bagian Poros KM. Surya Tulus Akibat Torsi dengan Metode Elemen Hingga”. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui besarnya intensitas tegangan akibat cacat produksi yang menyebabkan perambatan retak. Penelitian ini dilakukan dengan metode elemen hingga dan validasi hasil dilakukan dengan membandingkan panjang retak hasil simulasi dengan panjang retak yang terjadi pada kasus sebenarnya. Material untuk pemodelan ini adalah poros antara yang mempunyai spesifikasi baja AISI 1045. Pemodelan dilakukan dengan mem-variasi kecepatan putar dari *gear box* kapal pada 98 – 196 rpm. Dari variasi yang dilakukan, diketahui bahwa Intensitas tegangan pada 128 dan 165 rpm menyebabkan perambatan retak sebesar 186.7 mm. Pada proses simulasi retak, maka didapatkan hasil factor intensitas tegangan yang dapat dilihat pada Tabel II.3.

Tabel II.3. Intensitas Tegangan pada Tiap RPM
(Raharjo, 2012)

Rpm	K (Mpavm)		ΔK (Mpavm)	da/dN (m/cycle)
	max	min		
98	7.0093	6.56E-15	7.0093	2.37615E-09
100	7.2659	6.79E-15	7.27E+00	2.64678E-09
109	8.6535	8.08E-15	8.65E+00	4.4712E-09
115	9.6092	8.94E-15	9.61E+00	6.12225E-09
120	10.463	9.78E-15	1.05E+01	7.90347E-09
122	10.814	1.01E-14	1.08E+01	8.72586E-09
123	10.992	1.03E-14	1.10E+01	9.16388E-09
124	11.172	1.05E-14	1.12E+01	9.62148E-09
128	11.904	1.11E-14	11.904	1.16393E-08
140	14.305	1.34E-14	1.43E+01	2.01982E-08
163	19.304	1.80E-14	1.93E+01	4.96353E-08
165	19.781	1.85E-14	1.98E+01	5.34065E-08
170	20.999	1.97E-14	20.999	6.38918E-08
196	28.037	2.61E-14	2.80E+01	1.5207E-07

Tabel II.3 menunjukkan bahwa intensitas tegangan pada tiap – tiap rpm. Intensitas tegangan ini akan mempengaruhi kecepatan perambatan retak. Semakin besar nilai dari intensitas tegangan, maka semakin besar pula perambatan retak yang akan terjadi. Pada kasus K.M. Surya Tulus ini harga intensitas tegangan terjadi pada daerah lubang pasak. Tepatnya, pada daerah ujung cacat akibat produksi. Pada saat struktur mengalami retak, belum tentu retak tersebut akan menjalar. Nilai Intensitas tegangan tersebut harus dibandingkan terlebih dahulu dengan ΔK_{th} . Jika harga dari intensitas tegangan melebihi ΔK_{th} maka retak dapat dikatakan menjalar. Tetapi jika harga Intensitas tegangan masih dibawah atau sama dengan nilainya, maka retak belum menjalar.

4. Analisa laju perambatan fatik material komposit

Hafis Syafrudin Anshari (2010) telah melaksanakan penelitian mengenai “Karakteristik Laju Perambatan Retak Fatik Bahan Komposit Berpenguat Serat Kenaf dengan Matrik Polyester”. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui korelasi hubungan antara siklus pembebanan dengan panjang retak komposit serat kenaf (acak, anyam, kontinyu, acak-anyam-acak, dan kontinyu-anyam-kontinyu), membandingkan karakteristik laju perambatan retak fatik komposit serat kenaf (acak, anyam, kontinyu, acak-anyam-acak, kontinyu-anyamkontinyu), serta melaksanakan analisa penampang patahan uji fatik komposit serat kenaf (acak, anyam, kontinyu, acak-anyam-acak, kontinyu-anyam-kontinyu). Dari hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa Karakteristik laju perambatan retak fatik komposit serat kenaf acak memiliki laju penjalaran retak sebesar $da/dN = 8.10^{-14}(\Delta K)^{4,810}$, serat kenaf anyam adalah $da/dN = 7.10^{-15}(\Delta K)^{4,918}$, serat kenaf acak-anyam-acak $da/dN = 1.10^{-14}(\Delta K)^{5,500}$, serat kontinyu-anyam-kontinyu adalah $da/dN = 7.10^{-9}(\Delta K)^{2,254}$

Dari keempat spesimen uji, komposit serat kontinyu-anyam-kontinyu memiliki laju perambatan retak yang paling lambat dikarenakan nilai dari konstanta m (angka eksponensial) paling kecil. Komposit serat kontinyu-anyamkontinyu dapat dikatakan memiliki laju perambatan retak yang lambat. Untuk komposit berpenguat serat anyam dapat dinyatakan memiliki karakteristik laju perambatan retak yang lebih cepat dari ke-empat spesimen uji lainnya. Hal ini disebabkan harga m (angka eksponensial) yang terbesar dari ke empat spesimen uji. Dengan kata lain semakin tinggi harga konstanta m (angka eksponensial) atau semakin tegak kurva karakteristik perambatan retak, maka semakin cepat spesimen mengalami kegagalan (laju perambatan retak semakin meningkat)

5. Perilaku retak aluminium paduan

Husaini (2006) dengan judul “Perilaku Retak Aluminium Paduan A6061-T6 pada Pembebanan *Mixed Mode*” membahas mengenai arah dan laju perambatan retak. Dalam prakteknya, penelitian ini membahas perilaku retak material aluminium paduan (A6061-T6) pada pembebanan mode campuran (Mode I+II). Spesimen dibuat dalam bentuk *Compact Tension Shear* (CTS) dan menggunakan alat pembebanan dimana sudut antara sumbu pembebanan dan permukaan retak bervariasi dari 90^0 (mode I) sampai 0^0 (mode II). Perilaku retakan awal dan perambatan retak dimonitor dengan alat mikroskop digital. Semakin kecil sudut pembebanan, beban yang dibutuhkan pada spesimen untuk memulai terjadinya awal retakan semakin besar. Pada pembebanan dengan komponen mode II relatif tinggi, terlihat bahwa retak tipe geseran terjadi lebih dulu kemudian diikuti dengan retak tipe terbuka.

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini ialah arah penjalaran retak yang diukur dengan *bevel protector* sama dengan sudut perluasan retak (ϕ). Secara teoritis bahwa arah penjalaran retak selalu tegak lurus dengan arah pembebanan dan pada pembebanan mode I yaitu pada sudut $\alpha = 90^0$, terjadi arah penjalaran retak (ϕ) = 0^0 . Dan seterusnya, makin kecil sudut pembebanan, maka arah penjalaran retak (ϕ) akan semakin besar. Selain itu, untuk melihat laju penjalaran retak dari hasil yang dicatat oleh *digital stop watch* menunjukkan bahwa makin jauh dari ujung retak, maka awal penjalaran retak akan semakin cepat merambat pada laju pembebanan yang sama.

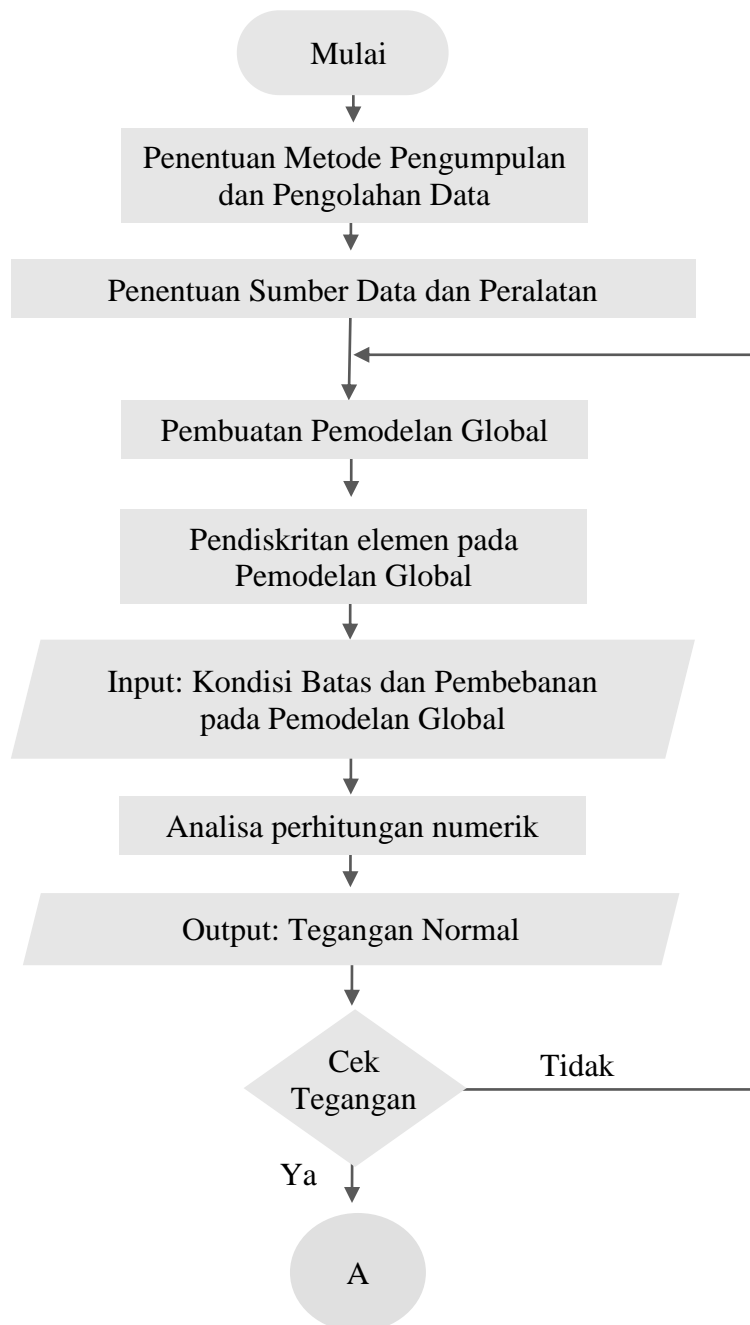
Halaman ini sengaja dikosongkan

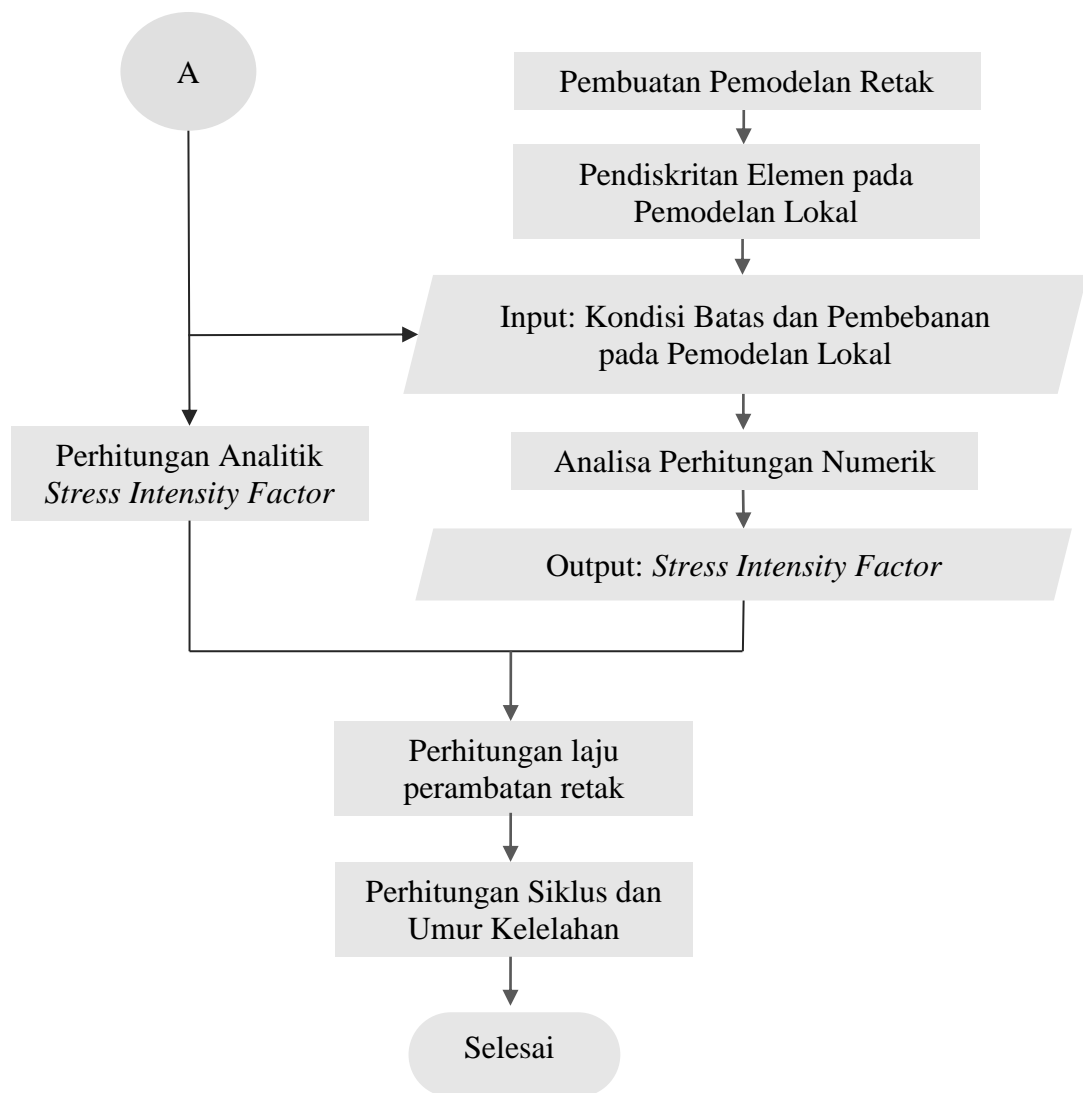
BAB III

METODOLOGI

III.1. Diagram Alir

Secara garis besar, metode penelitian yang dilaksanakan dalam penelitian analisa penjalaran retak dapat dilihat pada Gambar III.1.





Gambar III.1. Diagram Alir Penelitian

III.2. Penentuan Metode Pengumpulan dan Pengolahan Data

Penentuan metode pengumpulan data pada penelitian analisa penjalaran retak sekat ruang muat Kapal Tanker 17500 DWT berikut dilaksanakan dengan metode dokumentasi. Metode dokumentasi merupakan teknik pengumpulan data secara tidak langsung yang diperoleh melalui peninggalan secara tertulis maupun non-tertulis (elektronik) terutama berupa arsip-arsip, studi pustaka, buku jajak pendapat, *bulletin*, maupun dalil yang berhubungan dengan masalah penyelidikan. Dengan demikian, maka penulis melaksanakan metode dokumentasi mengenai data ukuran utama kapal melalui Perusahaan PT Dayar Radar Utama Indonesia. Sedangkan untuk data gelombang perairan Laut Jawa dan *Rule Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers* (Part CSR-T) diperoleh melalui artikel Badan Meteorologi, Klimatologi, & Geofisika (BMKG), dan *Rule International Association of Classification Societies* (IACS).

Sedangkan metode pengolahan data yang digunakan dalam penelitian ini adalah Metode *Finite elementt Analysis* (FEA), *Fracture Mechanic* (FM), dan Persamaan Paris. Metode FEA diaplikasikan untuk penentuan tegangan normal maksimum pada pemodelan struktur. Metode FM dan Persamaan Paris digunakan untuk menentukan parameter penjalaran retak. Melalui *Software FEA*, penulis melaksanakan proses pengolahan data dengan langkah sebagai berikut:

1. *Preprocessing* (pendefinisian masalah)

Tahapan pelaksanaan *preprocessing* terdiri dari:

- Penentuan *Engineering data* yang mendefinisikan tipe elemen dan bahan yang akan digunakan (sifat geometri)
- Pembuatan Geometri yang mendefinisikan *keypoint*, *lines*, *areas*, dan *volume*. Dalam hal ini permodelan dibuat sesuai dengan kondisi praktis yang terjadi di lapangan
- Penentuan *mesh lines*, *mesh areas*, atau *mesh volumes* sebagaimana yang dibutuhkan dalam perhitungan analisis FEA. Elemen *mesh* merupakan varabel utama yang akan dianalisa dalam pelaksanaan perhitungan *finite elementt*.

2. *Solution*

Tahapan pelaksanaan *solution* terdiri dari:

- Penentuan *constraints* (kondisi batas)
- Penentuan kondisi pembebanan
- Penyelesaian hasil persamaan melalui *software FEA*

3. *Postprocessing Phase*

Pada tahap ini didapatkan informasi penting mengenai hasil analisa data, seperti: nilai tegangan (*stress*) dalam analisa statik, distribusi kecepatan meknika fluida, distribusi temperatur dan lain-lain.

Sedangkan untuk pelaksanaan pengolahan data penjalaran retak, proses analisa dilaksanakan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Penentuan nilai tegangan normal maksimum pada model
2. Perhitungan nilai *Stress intensity factor* mode 1 (K1) melalui rumus pendekatan mekanika kepecahan (*fracture mechanics*)
3. Perhitungan laju perambatan retak (da/dN) melalui rumus pendekatan Persamaan Paris
4. Perhitungan *Number of Cycle* pada material (N)
5. Penentuan nilai *fatigue* pada material

III.3. Penentuan Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. *Rule Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers* (Part CSR-T) yang diperoleh dari *International Association of Classification Societies* (IACS)
2. Data Gelombang
Data gelombang diperoleh melalui Badan Meteorologi, Klimatologi, & Geofisika (BMKG) yang meliputi:
 - a. Panjang gelombang air laut
 - b. Tinggi gelombang air laut
 - c. Periode gelombang air laut
3. Data kapal
Data Kapal Tanker 17500 DWT diperoleh dari Perusahaan PT Dayar Radar Utama Lamongan yang meliputi:
 - a. *General Arrangement* (GA) Kapal dalam format CAD (Gambar III.2)
 - b. *Midship section* kapal dalam format PDF
 - c. Beragam gambar *section* kapal dalam format PDF
 - d. Gambar detail kapal dalam format JPEG
 - e. Gambar sketch Sekat *Corrugated* Ruang Muat Kapal Frame 100

III.4. Pembuatan Pemodelan Global

Berdasarkan *Rule CSR-T Appendix B/2.2.1*, analisa *finite element* pada umur konstruksi kapal dilaksanakan dengan memodelkan struktur tiga ruang muat kapal pada daerah *midship*. Komponen sistem penegar beserta penguatan yang lain harus terpasang pada model. Selain itu, sekat melintang juga harus terpasang pada kedua ujung model. Jika sekat tersebut berbentuk *corrugated*, maka komponen *stool* dan penguat lain pun harus terpasang pada model. Dengan demikian, maka pembuatan model dapat dilaksanakan dengan *software Finite Element Analysis* (FEA). Melalui *software* tersebut, pembuatan pemodelan struktur di-implementasikan pada komponen sistem *Design Modeller* dengan mode analisis *Static Structural*. Adapun tahap pembuatan pemodelan struktur adalah:

1. Pembuatan sketsa 2 dimensi konstruksi sekat melintang

Permodelan sketsa sekat melintang kapal dilaksanakan dengan berpedoman pada data gambar detail sekat melintang kapal, yaitu sekat *corrugated* dengan lebar total 24.7 m dan ketebalan 14 mm.

2. Pembuatan sketsa 2 dimensi konstruksi *double bottom*

Pemodelan sketsa konstruksi *double bottom* dilaksanakan dengan berpedoman pada gambar *midship section* kapal, yaitu dengan lebar total 27.7 m, tinggi 1.85 m, ketebalan pelat (*bottom & inner bottom plate*) 12 mm, dengan jarak penegar-penegar *longitudinal* sebesar 0.6 m.

3. Pembuatan sketsa 2 dimensi konstruksi *wing tank*

Permodelan sketsa konstruksi *wing tank* dilaksanakan dengan berpedoman pada gambar *midship section* kapal dengan jarak *double hull* sebesar 1.5 m, jarak penegar 0.65 m, dengan ketebalan pelat sebesar 12 mm.

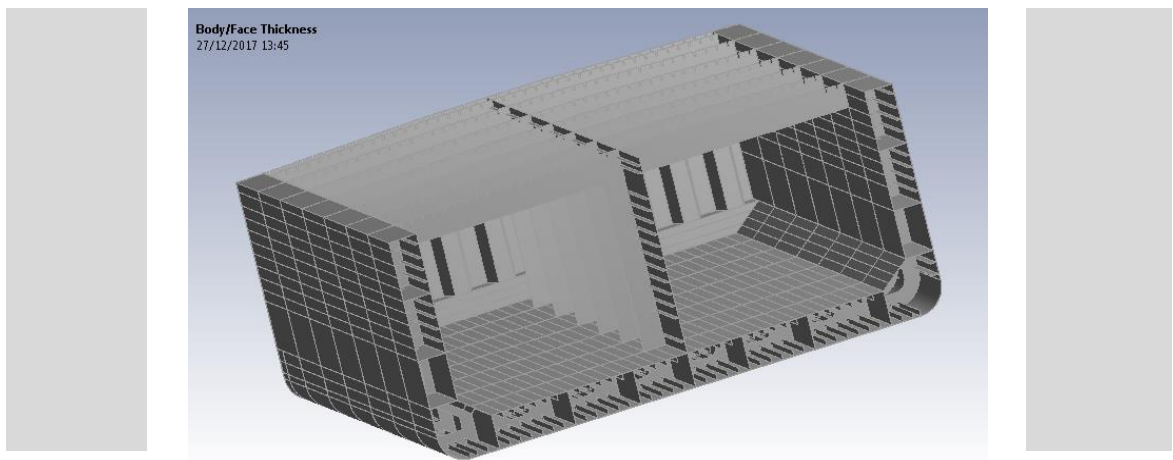
4. Pembuatan sketsa 2 dimensi konstruksi geladak

Permodelan konstruksi sketsa geladak dilaksanakan dengan berpedoman pada gambar detail konstruksi geladak kapal dengan lebar total sebesar 27.7 m, tebal 11 mm, dan jarak gading sebesar 0.6 m.

5. Pembuatan sketsa 2 dimensi tulangan kapal

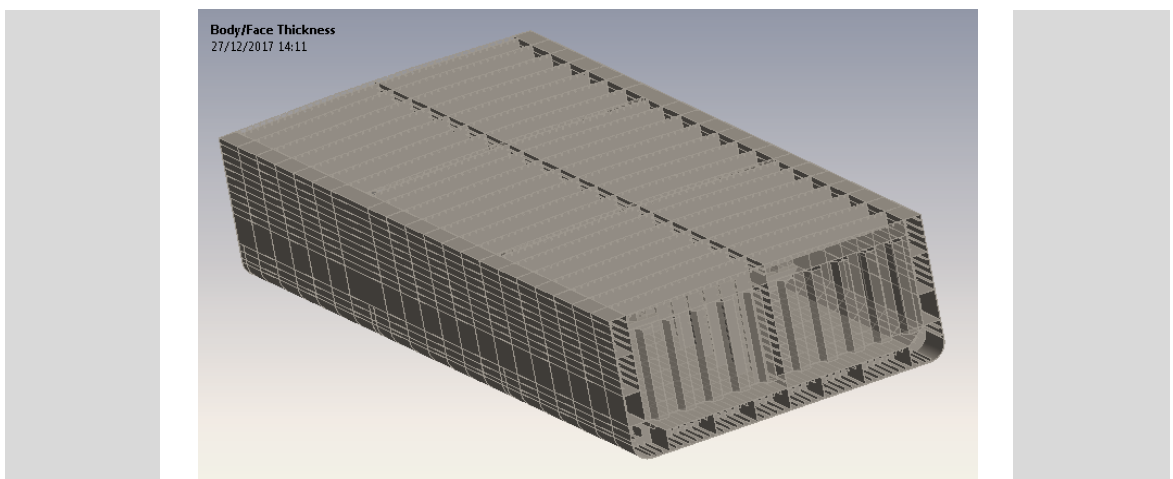
Permodelan sketsa tulangan kapal dilaksanakan melalui pembuatan sketsa beam, frame, dan floor. Web beam dibuat dengan ukuran 1250 mm x 11 mm, web frame dengan ukuran 1500 mm x 11 mm, dan floor dengan ukuran 1850 mm x 12 mm. semua kesatuan tersebut dibuat dalam satu mode gambar sketsa.

Setelah pembuatan sketsa 2 dimensi selesai, maka tahap selanjutnya adalah meng-*extrude* sketsa untuk mengkonversi model menjadi material solid 3 Dimensi. Pada sketsa konstruksi sekat melintang dilaksanakan *extrude* kearah vertikal dengan ukuran sesuai tinggi sekat. Pada sketsa konstruksi *double bottom*, geladak, dan *wing tank* dilaksanakan *extrude* kearah memanjang kapal dengan ukuran sesuai panjang ruang muat. Sedangkan pada sketsa tulangan dilaksanakan *extrude* ke arah masing-masing ketebalan material. Setiap sketsa di-*extrude* dengan *frozen mode* untuk menghindari penyatuan antar komponen solid secara menyeluruh. Sehingga jika proses *extrude* telah selesai, maka akan menghasilkan desain kesatuan blok ruang muat kapal yang dapat dilihat pada gambar Gambar III.3.



Gambar III.3. Permodelan Sebuah Tanki Ruang Muat

Jika pembuatan sepasang blok ruang muat telah selesai, maka blok beserta seluruh komponennya dapat di-*copy* melalui menu *pattern* sebanyak dua kali sehingga komponen blok berubah menjadi permodelan struktur tiga ruang muat kapal yang dapat dilihat pada Gambar III.4.

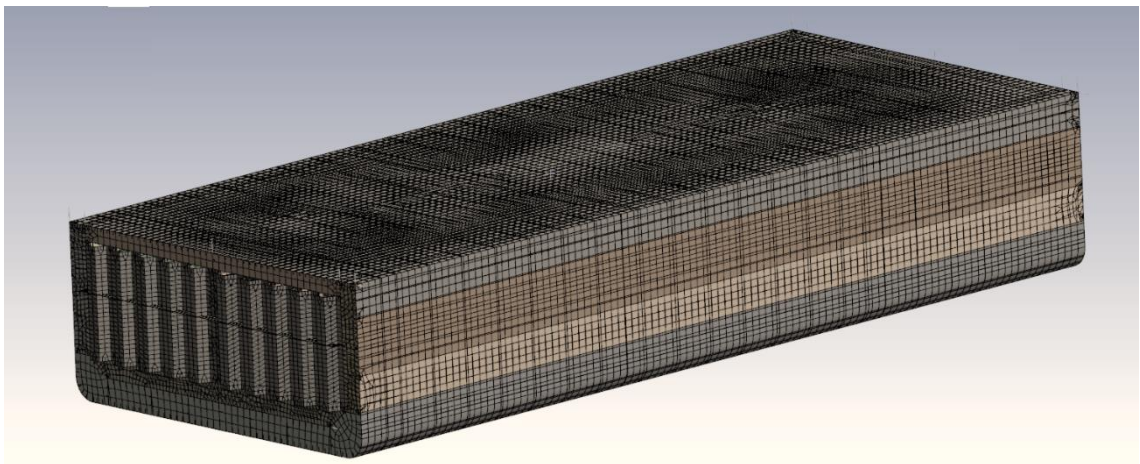


Gambar III.4 Permodelan Tanki Tiga Ruang Muat

III.5. Penentuan Elemen *Mesh* pada Pemodelan Global

Setelah pembuatan pemodelan struktur selesai, maka pekerjaan dilanjutkan dengan pembuatan *meshing* (Gambar III.5) pada model melalui fasilitas *meshing application*, *software Finite Element Analysis* (FEA). Melalui fasilitas tersebut, pemodelan *meshing* dilaksanakan sesuai dengan Regulasi CSR-T Appendix B/2.2.1.6, yaitu ukuran elemen *mesh* sebisa mungkin dikondisikan mengikuti alur sistem penegar tiap panel kapal dengan mode *fine mesh Analysis*. Oleh karena itu, maka langkah-langkah pengaturan permodelan *meshing* pada *Software Finite Element Analysis* (FEA) adalah sebagai berikut:

1. Mengatur *physics references* menjadi mode *mechanical* dengan tipe *Rigid Body Dynamic Solver*. Hal tersebut dilaksanakan karena analisa *finite elementt* yang digunakan adalah perhitungan mekanika teknik tegangan struktur
2. Mengatur *basic control* menjadi *fine mesh Analysis*, karena analisa yang harus digunakan dalam perhitungan struktur sesuai dengan Regulasi *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers (CSR-T) Appendix B* adalah mode *fine mesh*, yaitu element *mesh* yang memiliki kerekatan nodal elemen yang tinggi
3. Mengatur metode *mesh* menjadi elemen *hex dominant dan multizone*. Elemen *hex dominant* dilaksanakan untuk geometri berbentuk petak, seperti: *side stringer, deck, longitudinals*, dll. Sedangkan elemen *multizone* dilaksanakan untuk geometri berbentuk lengkung, seperti: *bilge, manhole pada floor, manhole pada bulkhead*, dll.
4. Mengatur *size element* menjadi sesuai jarak gading, yaitu 0.60 m untuk arah transversal, 0.65 m untuk arah vertical, dan 0.75 untuk arah longitudinal.
5. Merapikan beberapa susunan elemen *mesh* yang tidak atau kurang terstruktur melalui menu *mapped-face meshing*



Gambar III.5. *Meshing* Pemodelan Tiga Ruang Muat Kapal

Setelah proses *meshing* selesai, maka dapat dilakukan pengecekan kualitas elemen *mesh* pada tiap unsur geometri yang berupa:

1. *Mesh shape*, yaitu peninjauan pembentukan matrik kekakuan element (bisa jadi 0 atau bahkan bernilai negatif). Semakin masing-masing sudut pada keempat simpul mendekati 90^0 atau berbentuk kotak, maka kualitas shape semakin baik
2. *Aspect ratio*, perbandingan panjang sisi vertikal dan horisontal sebaiknya berkisar 1. Ketika hasil yang ditinjau adalah tegangan, nilai ini tidak boleh lebih dari 1/3. Namun jika yang ditinjau defleksi/deformasi dapat tidak lebih dari 1/5.
3. Penentuan nilai *tapered* dengan indikasi perbandingan lebih besar dari 0,5
4. Penentuan sudut kemiringan (*skew angle*) dengan indikasi perbandingan nilai sudut lebih besar dari 30^0
5. Penentuan warping pada curved *3D Shell*, terutama *double curvature*

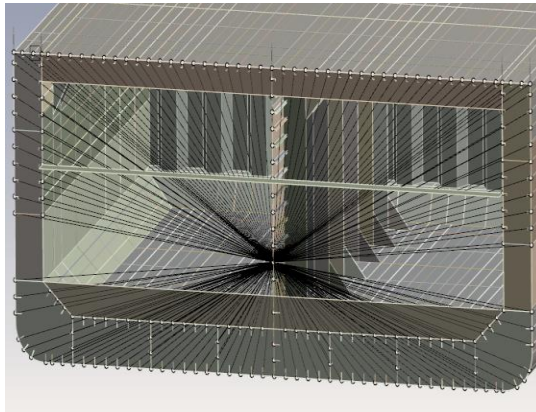
III.6. Penentuan Kondisi Batas pada Pemodelan Global

Setelah proses pemodelan *mesh* selesai, maka pekerjaan selanjutnya adalah pelaksanaan penentuan kondisi batas (*boundary layer*). Penentuan simpul pada kondisi batas akan sangat menentukan hasil perhitungan *finite elementt* karena berfungsi sebagai *transfer energy* antar komponen *rigid* ataupun lingkungan. Implementasi kondisi batas pada penelitian ini dilaksanakan sesuai dengan Regulasi CSR-T Appendix B/2.2.1. Dalam regulasi tersebut dinyatakan bahwa kondisi batas pada pemodelan struktur kapal *tanker* diaplikasikan pada area *after end* dan *fore end* pada model. *Rigid link* harus terpasang pada area tersebut dan menghubungkan antara nodal struktur *longitudinal* dengan titik *independent point* yang terletak pada netral axis. Selain itu, kondisi *fix support* juga harus terpasang pada arah translasi sumbu x pada bagian *after end*. Oleh karena itu, untuk memenuhi persyaratan tersebut, maka dilaksanakan penentuan kondisi batas pada *Software Finite Element Analysis* (FEA) sebagai berikut:

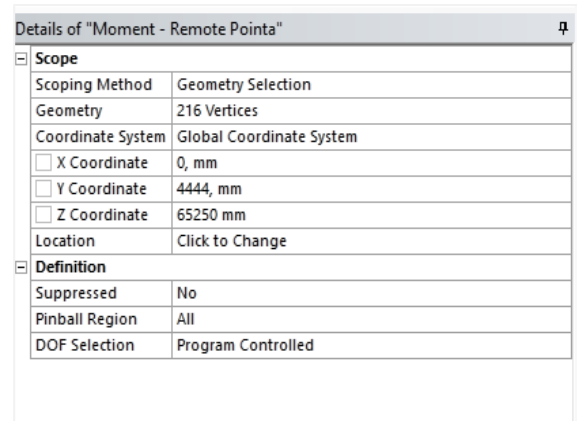
1. Penentuan kondisi batas *independent Point* dan *rigid Link*

Berdasarkan Regulasi CSR-T Appendix B 2.5.4.6, Penentuan *independent point* terletak pada titik pertemuan antara garis *centreline* dengan garis normal. Semua *nodal point* struktur *longitudinal* pada model harus terhubung pada *independent point* melalui *rigid link*, sehingga *independent point* tidak terhubung secara langsung pada model. Melalui *independent point* tersebut, maka dapat dilakukan perhitungan *Vertical Bending Moment*, *Horisontal Bending Moment*, maupun penentuan *fix support*.

Melalui *Software Finite Element Analysis* (FEA), maka dapat digunakan menu *remote point* pada menu *tab Model*. Melalui *tab detail remote point* (Gambar III.6) dapat dilaksanakan proses penentuan *nodal point* pada geometri beserta titik koordinat pusat beban (*Independent point*). Setelah penentuan detail selesai, maka dapat dilihat garis-garis *rigid link* yang menghubungkan *nodal point* dengan koordinat pusat beban struktur. (Gambar III.7)



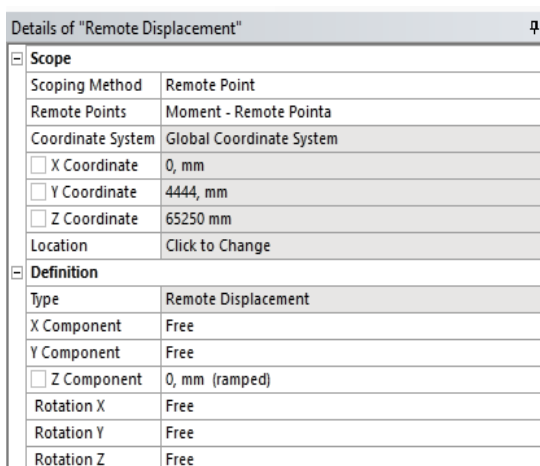
Gambar III.7. Titik *Independent Point* pada Ujung Model



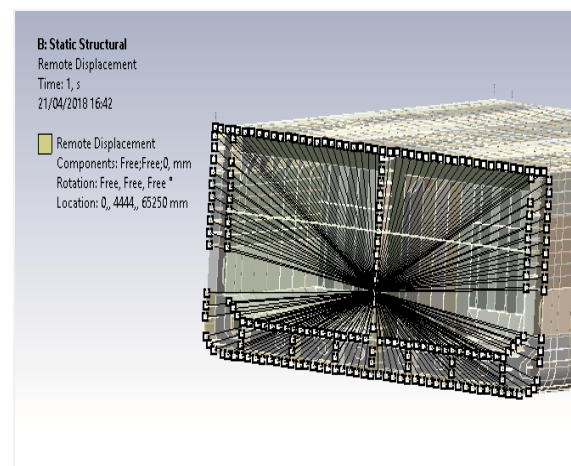
Gambar III.6. Pengaturan Detail *Remote Point*

2. Penentuan kondisi batas *fix support*

Berdasarkan Regulasi CSR-T Tabel B.2.9, kondisi batas *fix support* terletak pada arah translasi sumbu-x. Peletakan kondisi batas tersebut terletak pada *independent point* yang terhubung pada *rigid link* di area *after end* (Gambar III.8). Melalui *Software Finite Element Analysis* (FEA), maka dapat digunakan menu *remote displacement support* dengan *detail scope* dan *definition* yang dapat dilihat pada Gambar III.9.



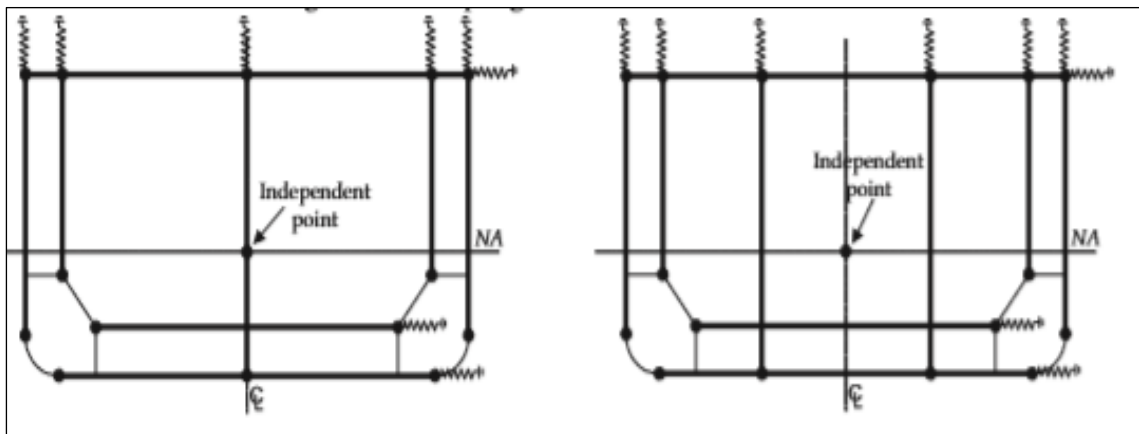
Gambar III.9. Detail *Scope* dan *Definition* pada *Remote Displacement Support*



Gambar III.8. *Remote Displacement* yang Terhubung pada *Rigid Link*

3. Penentuan kondisi batas *ground spring*

Tumpuan pegas (*ground spring*) adalah tumpuan dengan pemakaian prinsip elastisitas yang dapat bergerak tegak lurus terhadap sumbu bebas penampang. Tumpuan pegas atau tumpuan elastis dengan sifat elastisitasnya dapat berubah bentuk apabila dikenai gaya, namun memiliki kemampuan yang tinggi untuk mengembalikan bentuknya ke bentuk semula apabila beban dihilangkan (ditiadakan). Berdasarkan Regulasi CSR-T Appendix B 2.6.1, penentuan tumpuan *ground spring* terletak pada bagian ujung depan dan ujung belakang pada model (Gambar III.3.10). Tumpuan *Ground Spring* terdiri dari dua jenis, yaitu pada derajat kebebasan sumbu y (arah horizontal) dan sumbu z (arah vertical). Derajat kebebasan sumbu y teraplikasi pada *deck*, *inner bottom*, dan *bottom shell*. Sedangkan derajat kebebasan sumbu x teraplikasi pada *side shells*, *inner hull longitudinal bulkhead*, dan *oil-tight longitudinal bulkhead*.



Gambar III.10. Penentuan Posisi *Ground Spring* pada Kedua Ujung Model
(Sumber: Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers, 2015)

Gambar III.10 menunjukkan bahwa titik pusat *ground spring* terletak pada titik *independent point*. Melalui perhitungan konstanta c (*string stiffness*), maka didapatkan nilai kondisi batas *vertical string stiffness* maupun *horizontal string stiffness* yang dapat didefinisikan melalui persamaan III.1.

$$c = \left(\frac{E}{1+\nu} \right) \frac{A_{s-net 50}}{l_{tk} n} = 0.77 \frac{A_{s-net 50}}{l_{tk} n} \quad (III.1)$$

Berdasarkan Rule CSR-T Appendix B 2.6.2, maka didapatkan nilai kondisi batas *vertical ground spring* dan *horizontal ground spring* pada ujung depan dan belakang sebagai input *loading* pemodelan *Finite Element* yang dapat dilihat pada Table III.2 dan Tabel sebagai berikut III.3.

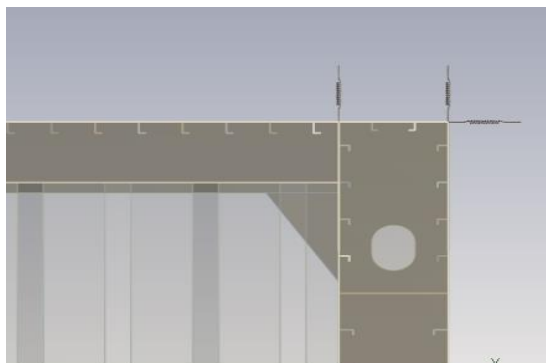
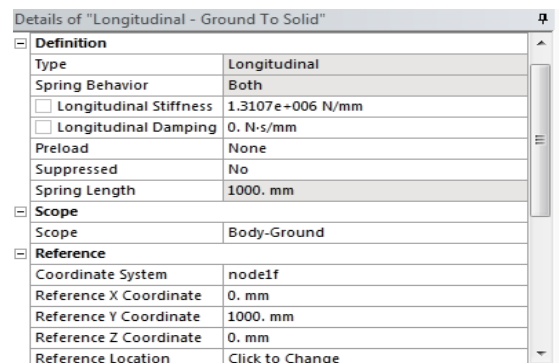
Tabel III.2. Hasil Perhitungan *Vertical Spring Stiffness* pada Tiap *Node*

No.	Object	Unit	Nodal Point				
			node 1	node 2	node 3	node 4	node 5
1	A _{s-net50-1}	mm ²	73293	20350	51000	20350	73293
2	A _{s-net50-2}	mm ²	34300	24148	68750	24148	34300
3	A _{s-net50-3}	mm ²	47940	36400	22500	36400	47940
4	A _{s-net50-4}	mm ²	29575	47940	-	47940	29575
5	A _{s-net50-5}	mm ²	-	29575	-	29575	-
6	A _{s-net50}	mm ²	185108	158413	142250	158413	185108
7	N	-	1	1	1	1	1
8	c	N/mm	1310650	1121637	1007195	1121637	1310650

Tabel III.3. Hasil Perhitungan *Horisontal Spring Stiffness* pada Tiap *Node*

No.	Object	Unit	Nodal Point		
			node 1	node 2	node 3
1	A _{s-net50-1}	mm ²	4,16E+05	15000	36500
2	A _{s-net50-2}	mm ²	-	24148	1,26E+05
3	A _{s-net50-3}	mm ²	-	2,59E+05	33000
4	A _{s-net50-4}	mm ²	-	24148	1,26E+05
5	A _{s-net50-5}	mm ²	-	15000	36500
6	A _{s-net50}	mm ²	4,16E+05	337406	358000
7	N	-	1	1	1
8	c	N/mm	2941931	2388990	2534805

Setelah menentukan nilai konstanta *c* pada bagian *vertical* dan *horizontal*, maka dilaksanakan input kondisi batas *ground spring* pada model FEA dengan cara meng-*insert spring connection*, menentukan detail *ground spring* (Gambar III.11), serta menentukan letak posisi *ground spring* pada model *finite element* (Gambar III.12).

Gambar III.12. Penentuan Peletakan *Ground Spring* pada Arah Sumbu *y* dan *z*Gambar III.11. Detail Penentuan *Input Ground Spring* pada Model

III.7. Penentuan Kondisi Pembebanan pada Model Global

Berdasarkan Regulasi CSR-T Appendix C 1.3.1.2, perhitungan analisa beban *fatigue* terdiri dari beban *hull girder* (*Vertical Bending Moment* dan *Horisontal Bending Moment*), beban gelombang dinamis, dan beban tanki dinamis. Adapun hasil perhitungan dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Beban Gelombang Dinamis

Berdasarkan Regulasi CSR-T Section 7/3.5.4, perhitungan distribusi beban gelombang dinamis ditentukan melalui potongan melintang *hull* di tiap sisi-sisi koordinat *longitudinal*. Distribusi Beban tersebut diaplikasikan pada perhitungan panjang secara menyeluruh. Adapun perhitungan beban tersebut dilaksanakan melalui Persamaan II.63 hingga II.65 sehingga dihasilkan nilai P_1 melalui Tabel III.4 dan III.5

Tabel III.4. Perhitungan Beban Gelombang Dinamis Vertikal

no	Gading	y (m)	z (m)	f_2	f_1	P_{ex-amp} (kN/m ²)	y (m)	P_0 (kN/m ²)	P_1 (kN/m ²)
	h _{WL 0}	-13,9	12,37	-	-	0	0	-	0
1	LV 0	-13,9	12,04	1	1	54,11	0,326	-	1,63
2	LV 1	-13,9	11,58	1	1	53,56	0,786	-	3,93
3	LV 2	-13,9	10,93	1	1	52,78	1,436	-	7,18
4	LV 3	-13,9	10,28	1	1	52	2,086	-	10,43
5	LV 4	-13,9	9,63	1	1	51,22	2,736	-	13,68
6	LV 5	-13,9	8,98	1	1	50,44	3,386	-	16,93
7	LV 6	-13,9	8,33	1	1	49,66	4,036	-	20,18
8	LV 7	-13,9	7,68	1	1	48,88	4,686	-	23,43
9	LV 8	-13,9	7,03	1	1	48,1	-0,47	1,786	26,12
10	LV 9	-13,9	6,38	1	1	47,32	-1,12	4,256	28,59
11	LV 10	-13,9	5,73	1	1	46,54	-1,77	6,726	31,06
12	LV 11	-13,9	5,08	1	1	45,76	-2,42	9,196	33,53
13	LV 12	-13,9	4,43	1	1	44,98	-3,07	11,67	36
14	LV 13	-13,9	3,78	1	1	44,2	-3,72	14,14	38,47
15	LV 14	-13,9	3,13	1	1	43,42	-4,37	16,61	40,94
16	LV 15	-13,9	2,48	1	1	42,64	-	-	42,64
17	LV 16	-13,9	1,85	1	1	41,88	-	-	41,88
18	LH 1,4	-13,7	0,926	0,984	0,995	40,66	-	-	40,66
19	LH 1,5	-13,4	0,439	0,937	0,981	39,75	-	-	39,75
20	LH 1,6	-12,9	0,114	0,866	0,96	38,9	-	-	38,9
21	LH 21	-12,4	0	0,783	0,935	38,21	-	-	38,21

Tabel III.5. Perhitungan Beban Gelombang Dinamis Horizontal

Gading	s (m)	y (m)	z (m)	f ₂	f ₁	P ₁ (kN/m ²)
LH 0	0	0	0	-0,25	0,625	31,32
LH 1	-0,6	-0,6	0	-0,23	0,631	31,46
LH 2	-0,6	-1,2	0	-0,21	0,638	31,61
LH 3	-0,6	-1,8	0	-0,19	0,644	31,75
LH 4	-0,6	-2,4	0	-0,16	0,651	31,9
LH 5	-0,6	-3	0	-0,14	0,657	32,04
LH 6	-0,6	-3,6	0	-0,12	0,664	32,19
LH 7	-0,6	-4,2	0	-0,1	0,67	32,33
LH 8	-0,6	-4,8	0	-0,08	0,677	32,48
LH 9	-0,6	-5,4	0	-0,06	0,683	32,62
LH 10	-0,6	-6	0	-0,03	0,69	32,76
LH 11	-0,6	-6,6	0	-0,01	0,696	32,91
LH 12	-0,6	-7,2	0	0,04	0,712	33,25
LH 13	-0,6	-7,8	0	0,126	0,738	33,83
LH 14	-0,6	-8,4	0	0,213	0,764	34,41
LH 15	-0,6	-9	0	0,3	0,79	34,99
LH 16	-0,6	-9,6	0	0,386	0,816	35,56
LH 17	-0,6	-10,2	0	0,473	0,842	36,14
LH 18	-0,6	-10,8	0	0,56	0,868	36,72
LH 19	-0,55	-11,4	0	0,639	0,892	37,25
LH 20	-0,55	-11,9	0	0,718	0,916	37,78
LH 21	-0,45	-12,4	0	0,783	0,935	38,21

2. Beban *Vertical Bending Moment* dan *Horisontal Bending Moment*

Moment lentur (*Bending moment*) adalah *moment* yang ditimbulkan oleh suatu gaya atau lebih pada suatu benda sehingga benda tersebut mengalami kecenderungan untuk berubah bentuk atau defleksi. Berdasarkan Rule CSR-T Appendix B 2.5.4, perhitungan beban *global* (*vertical bending moment* dan *horizontal bending moment*) diaplikasikan pada kedua ujung depan dan belakang pada model tiga ruang muat. Perhitungan *bending moment* tersebut diaplikasikan melalui *independent point* yang terhubung pada *rigid link* pada tiap-tiap *nodal point* struktur *longitudinal*. Adapun perhitungan nilai *horizontal and vertical bending moment* dapat ditentukan melalui Persamaan II.69 dan II.70, sehingga dihasilkan nilai *bending moment* sebagai input pembebanan model *finite element* (FEA) dengan hasil sebagai berikut.

$M_{wv-v-amp}$	460711,70	kNm
$M_{wv-h-amp}$	215005,94	kNm

3. Beban tanki dinamis

Beban tanki dinamis (*dynamic tank pressure*) merupakan beban kapal yang terjadi akibat tekanan fluida muatan pada saat kondisi berfluktuasi. Berdasarkan Rule CSR-T Appendix B 2.4.4, Perhitungan distribusi beban tanki dinamis ditentukan melalui potongan melintang dan memanjang *hull* di tiap sisi *vertical*, *tranverse*, maupun *longitudinal*. Beban tanki dinamis memperhitungkan perhitungan *roll & pitch*, akselerasi kapal, dll. Dengan parameter tersebut, maka didapatkan perhitungan beban tanki dinamis pada tiap arah *vertical*, *tranverse*, maupun *longitudinal* melalui Persamaan II.68, sehingga dihasilkan nilai P_{in-amp} pada Tabel III.6 hingga III.8.

Tabel III.6. Perhitungan Beban Amplitudo untuk Tanki I

no.	Gading	P_{in-amp} (kN/m ²)								
		LL 0	LL 1	LL 2	LL 3	LL 4	LL 5	LL 6	LL 7	LL 8
1	LV -1	-1,50	-1,64	-1,73	-1,91	-2,09	-2,27	-2,45	-2,63	-2,72
2	LV 0	-0,78	-0,97	-1,09	-1,34	-1,59	-1,84	-2,09	-2,34	-2,46
3	LV 1	-0,03	-0,27	-0,43	-0,75	-1,07	-1,38	-1,70	-2,01	-2,17
4	LV 2	1,06	0,74	0,54	0,12	-0,29	-0,70	-1,11	-1,52	-1,73
5	LV 3	2,18	1,79	1,54	1,03	0,52	0,02	-0,49	-0,99	-1,24
6	LV 4	3,33	2,87	2,57	1,96	1,36	0,76	0,16	-0,43	-0,73
7	LV 5	4,49	3,97	3,62	2,92	2,22	1,53	0,84	0,15	-0,19
8	LV 6	5,67	5,07	4,68	3,88	3,10	2,31	1,53	0,75	0,36
9	LV 7	6,85	6,18	5,74	4,85	3,97	3,09	2,22	1,35	0,91
10	LV 8	8,02	7,29	6,79	5,81	4,84	3,87	2,90	1,94	1,46
11	LV 9	9,18	8,37	7,83	6,76	5,69	4,63	3,56	2,51	1,98
12	LV 10	10,32	9,43	8,85	7,68	6,52	5,36	4,20	3,05	2,48
13	LV 11	11,42	10,46	9,83	8,56	7,30	6,05	4,80	3,56	2,94
14	LV 12	12,47	11,45	10,76	9,40	8,05	6,70	5,35	4,02	3,35
15	LV 13	13,48	12,38	11,65	10,19	8,74	7,29	5,85	4,42	3,70
16	LV 14	14,43	13,25	12,47	10,91	9,36	7,82	6,28	4,75	3,99
17	LV 1.1	16,87	15,66	14,85	13,24	11,64	10,05	8,46	6,88	6,10
18	LV 1.2	16,68	15,43	14,60	12,94	11,29	9,65	8,01	6,38	5,57
19	LV 1.3	16,43	15,14	14,28	12,58	10,88	9,18	7,50	5,82	4,98
20	LV 16	19,09	17,77	16,88	15,13	13,37	11,63	9,90	8,17	7,31

Tabel III.7. Perhitungan Beban Amplitudo untuk Tanki II

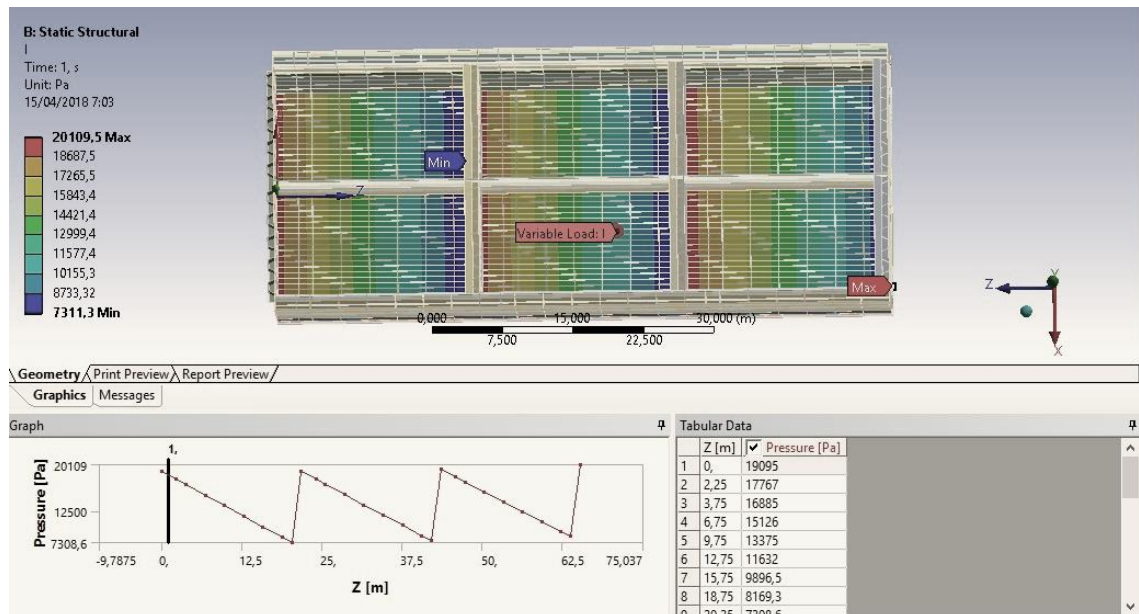
no	Gading	P _{in-amp} (kN/m ²)								
		LL 9	LL 10	LL 11	LL 12	LL 13	LL 14	LL 15	LL 16	LL 17
1	LV -1	-1,50	-1,64	-1,73	-1,91	-2,09	-2,27	-2,45	-2,63	-2,72
2	LV 0	-0,78	-0,97	-1,09	-1,34	-1,59	-1,83	-2,08	-2,32	-2,45
3	LV 1	-0,04	-0,27	-0,43	-0,74	-1,06	-1,37	-1,68	-1,99	-2,15
4	LV 2	1,05	0,74	0,54	0,13	-0,27	-0,68	-1,08	-1,48	-1,68
5	LV 3	2,16	1,79	1,54	1,04	0,55	0,05	-0,44	-0,93	-1,18
6	LV 4	3,31	2,86	2,57	1,98	1,39	0,81	0,23	-0,35	-0,64
7	LV 5	4,47	3,96	3,62	2,94	2,26	1,59	0,91	0,25	-0,09
8	LV 6	5,64	5,06	4,68	3,91	3,14	2,38	1,62	0,86	0,48
9	LV 7	6,82	6,17	5,74	4,88	4,02	3,17	2,32	1,47	1,05
10	LV 8	7,99	7,27	6,79	5,84	4,90	3,95	3,02	2,08	1,62
11	LV 9	9,14	8,36	7,83	6,79	5,76	4,72	3,70	2,67	2,16
12	LV 10	10,27	9,42	8,85	7,72	6,59	5,46	4,35	3,23	2,68
13	LV 11	11,37	10,44	9,83	8,60	7,38	6,17	4,96	3,76	3,16
14	LV 12	12,42	11,43	10,76	9,45	8,13	6,83	5,53	4,23	3,59
15	LV 13	13,42	12,36	11,65	10,24	8,83	7,43	6,03	4,65	3,96
16	LV 14	14,37	13,23	12,47	10,96	9,46	7,97	6,48	5,00	4,26
20	LV 16	19,02	17,74	16,89	15,18	13,49	11,81	10,13	8,46	7,62

Tabel III.8. Perhitungan Beban Amplitudo untuk Tanki III

no.	Gading	P _{in-amp} (kN/m ²)								
		LL 19	LL 20	LL 21	LL 22	LL 23	LL 24	LL 25	LL 26	LL 27
1	LV -1	-1,64	-1,73	-1,91	-2,09	-2,27	-2,45	-2,63	-2,72	-1,50
2	LV 0	-0,95	-1,07	-1,32	-1,56	-1,81	-2,05	-2,30	-2,42	-0,74
3	LV 1	-0,24	-0,40	-0,70	-1,01	-1,32	-1,63	-1,93	-2,08	0,05
4	LV 2	0,80	0,60	0,20	-0,20	-0,59	-0,99	-1,38	-1,58	1,20
5	LV 3	1,87	1,62	1,14	0,65	0,17	-0,31	-0,79	-1,03	2,39
6	LV 4	2,97	2,68	2,10	1,53	0,96	0,39	-0,17	-0,45	3,59
7	LV 5	4,08	3,75	3,09	2,43	1,78	1,12	0,47	0,15	4,82
8	LV 6	5,21	4,84	4,09	3,34	2,60	1,86	1,12	0,76	6,06
9	LV 7	6,34	5,92	5,09	4,26	3,43	2,60	1,78	1,37	7,30
10	LV 8	7,47	7,00	6,08	5,16	4,25	3,34	2,43	1,98	8,54
11	LV 9	8,58	8,07	7,06	6,05	5,05	4,05	3,06	2,57	9,76
12	LV 10	9,66	9,11	8,01	6,92	5,83	4,74	3,66	3,13	10,95
13	LV 11	10,71	10,11	8,93	7,74	6,57	5,40	4,23	3,65	12,11
14	LV 12	11,71	11,07	9,80	8,53	7,26	6,00	4,74	4,12	13,23
15	LV 13	12,67	11,98	10,61	9,25	7,90	6,55	5,20	4,53	14,30
16	LV 14	13,56	12,83	11,37	9,92	8,47	7,03	5,59	4,88	15,31
20	LV 16	18,13	17,30	15,65	14,02	12,39	10,76	9,15	8,34	20,11

Setelah mengetahui hasil perhitungan variasi pembebanan pada model, maka dapat dilakukan proses input data dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Menginput nilai tegangan pada model dengan cara menentukan menu *pressure loads* pada *environment* dengan *magnitude mode tubular data*. Pada mode *tubular* tersebut ditentukan arah pembebanan pada arah sumbu x, y, z sesuai dengan struktur geometri pada model tersebut (Gambar III.13).



Gambar III.13. Input Beban Mode *Tubular Data*

2. Menginput nilai perhitungan momen pada model dengan cara menentukan *remote moment* pada *environment* melalui *scope* penegar *longitudinal* pada model berdasarkan hasil perhitungan Regulasi CSR yang dapat dilihat pada Gambar III.14.

The figure displays the ANSYS Workbench interface for defining a remote moment. The top part shows a table of 'Details of AfterBM' with columns for Scope, Definition, and Advanced.

Details of "AfterBM"	
Scope	
Scoping Method	Remote Point
Remote Points	Moment - Remote Point
Definition	
Type	Moment
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	4.6071e+011 N-mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	2.1501e+011 N-mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	0. N-mm (ramped)
Suppressed	No
Advanced	

Gambar III.14. Input Data *Moment – Remote Point*

3. Setelah semua data input dan kondisi batas telah selesai dan telah dicek, maka dapat dilaksanakan penentuan hasil input pembebanan pada model. Karena hasil yang dibutuhkan adalah tegangan normal pada arah melintang, maka *solution* yang diambil adalah *normal stress* dengan arah sumbu y.
4. *Running software* FEA melalui menu *solve* pada fasilitas *static structural*

III.8. Hasil *Running Program*

Setelah dilaksanakan proses *running* pada *software* FEA, maka didapatkan dua *output* variasi pemodelan melalui gambar fotoelastis, yaitu tegangan normal maksimum pada saat kondisi *sagging* dan tegangan normal maksimum pada saat kondisi *hogging*. Skenario pembebanan kondisi *sagging* dan *hogging* merepresentasikan terjadinya tegangan siklis yang berpengaruh terhadap perambatan retak dan analisa kelelahan struktur. Penentuan nilai tegangan tersebut difokuskan pada bagian sekat ruang muat pada model. Melalui gambar fotoelastis distribusi tegangan, dapat diketahui area *hotspot* terjadinya keretakan struktur. Lalu area *hot spot* tersebut dibandingkan dengan referensi area *hotspot* dari *rule* CSR-T untuk menentukan nilai validitas suatu model. *Output* tegangan tersebut digunakan sebagai nilai parameter global untuk perhitungan *fracture mechanics*. Dengan demikian, dihasilkan nilai rentang tegangan maksimum pada saat skenario pembebanan kondisi *sagging* dan *hogging* kapal yang dapat dilihat pada Persamaan III.2 sebagai berikut.

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = \sigma_{sag-max} - \sigma_{hog-max} \quad (III.2)$$

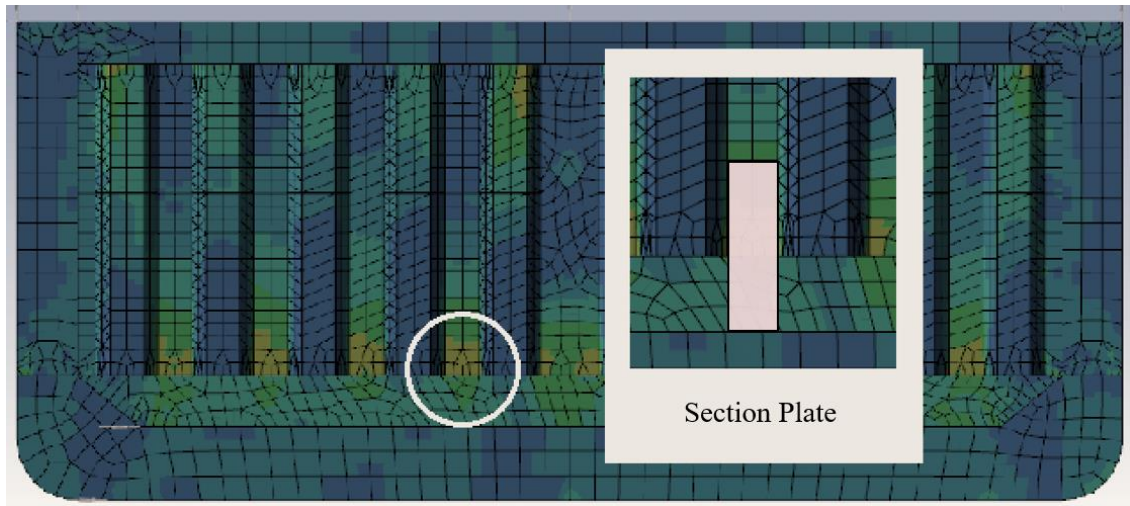
Dengan mengetahui nilai rentang tegangan, maka nilai tersebut di input melalui tahap pembebanan pada pemodelan lokal dengan variasi keretakan yang dimulai dari kedalaman awal retak (a_o) sebesar 0.5 mm hingga kedalaman retak akhir (a_f), yaitu ketebalan potongan pelat sebesar 14 mm.

III.9. Pembuatan Pemodelan Lokal

Setelah diketahui area dan nilai tegangan maksimum pada sekat melintang ruang muat kapal, maka dapat dilaksanakan proses pembuatan pemodelan lokal, yaitu pemodelan retak. Dalam pembuatan proses pemodelan retak, diambil irisan potongan pelat yang akan digunakan sebagai analisa perhitungan yang lebih terperinci. Irisan pelat tersebut adalah sambungan antara sekat *corrugated* dengan potongan *lower stool*. Pelat tersebut terletak pada Sekat Ruang Muat Kapal Tanker 17500 DWT pada *Frame* 100 dengan dimensi pelat yang dapat dilihat pada Tabel III.9.

Tabel III.9. Dimensi Irisan Potongan *Lower Stool* dan Sekat *Corrugated*

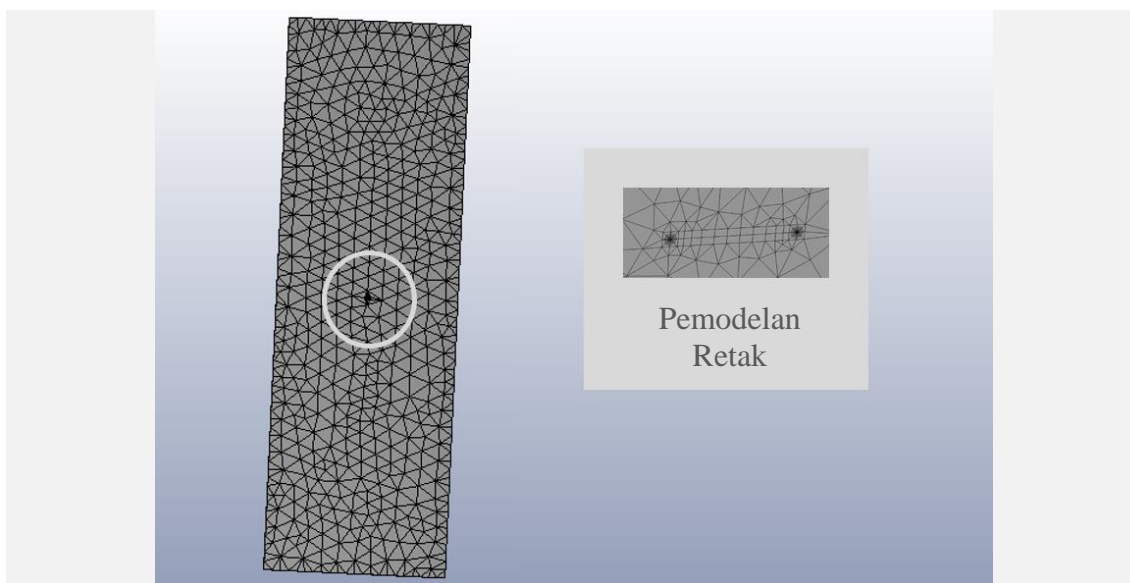
Panel	h (mm)	b (mm)	a (mm)
Sekat <i>Corrugated</i>	1280	840	14
<i>Lower stool</i>	1280	840	14



Gambar III.15. Pemodelan Lokal Irisan Potongan Pelat

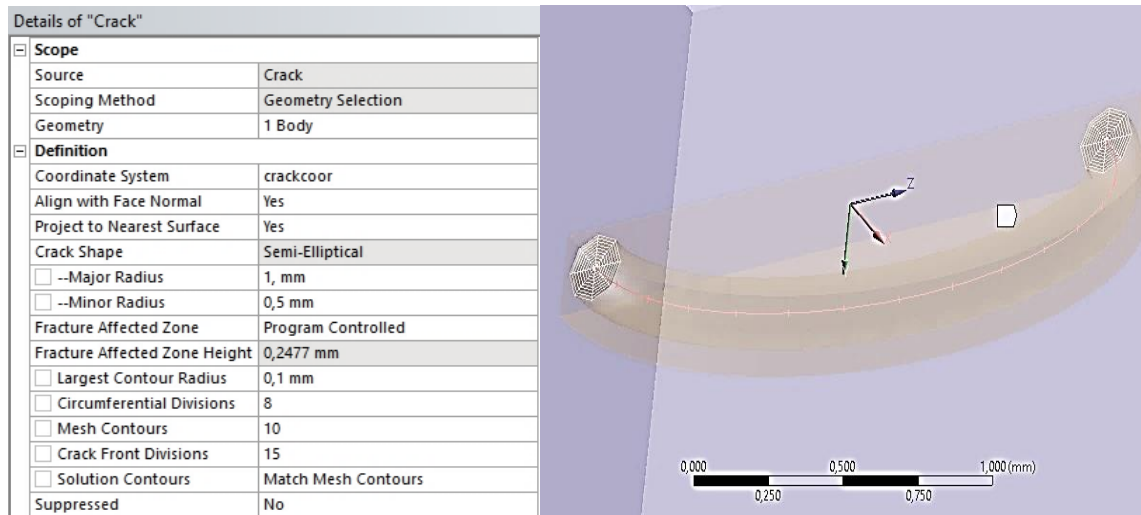
Setelah menentukan potongan pelat (Gambar III.15) yang akan digunakan sebagai analisis keretakan, maka tahap selanjutnya adalah pembuatan pemodelan retak (Gambar III.16) dengan langkah-langkah sebagai berikut.

1. Menentukan letak titik koordinat *crack* pada model, yaitu terletak ditengah-tengah sambungan *lower stool* dengan sekat *corrugated*



Gambar III.16. Pemodelan Retak pada Irisan Pelat

2. Menentukan jenis *crack* yang digunakan. Untuk penelitian ini diasumsikan *crack* yang terjadi pada model adalah retak *surface semi elliptical*
3. Menentukan kedalaman awal retak, yaitu ditentukan sesuai dengan analisis *American Bureau of Shipping* (ABS) yang menyatakan bahwa keretakan awal sering terjadi pada ukuran 0.5 mm. (Gambar III.17)



Gambar III.17. Pengaturan Detail Desain Struktur *Crack*

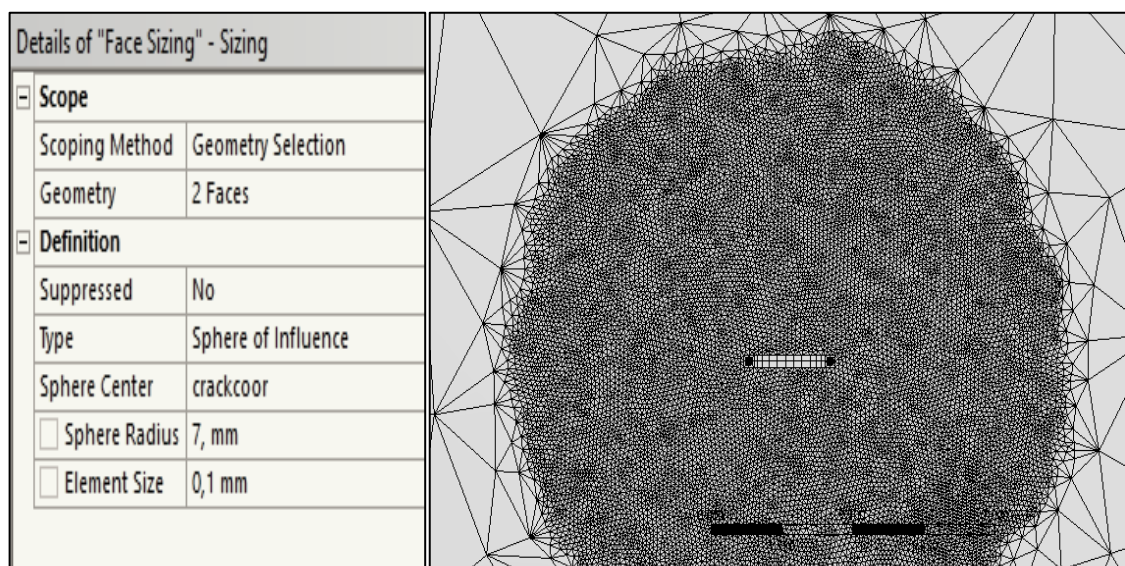
4. Menentukan panjang retak, yaitu diasumsikan sebesar dua kali panjang kedalaman retak. Dengan demikian, maka panjang *Major Radius* sebesar 0.5 panjang *Minor Radius*.
5. Menentukan kontur model di area *crack tip*, yaitu dengan ukuran berkisar antara 0.1 mm pada jarak tiap 10 kali jarak kontur. Kontur tersebut akan menentukan nilai besaran intensitas tegangan pada ujung *crack tip*

III.10. Pembuatan Elemen *Mesh* pada Pemodelan Lokal

Setelah pembuatan pemodelan retak telah selesai, maka dapat dilaksanakan proses *meshing*. *Meshing* pada pemodelan lokal dilaksanakan dengan menggunakan elemen tetrahedon. Hal tersebut disebabkan karena elemen segi empat yang digunakan dalam perhitungan struktur tidak mampu menjangkau struktur bentuk retakan dikarenakan *crack* memiliki kompleksitas geometri yang tinggi. Adapun tahapan dalam pembuatan *meshing* pemodelan lokal adalah:

1. Mengatur *physics references* menjadi mode *mechanical* dengan tipe *Rigid Body Dynamic Solver* karena analisa *finite elementt* yang digunakan dalam perhitungan mekanika teknik ialah Analisa tegangan struktur.

2. Mengatur *basic control* menjadi *fine mesh analysis*. Hal tersebut di-implementasikan karena analisa yang digunakan dalam perhitungan struktur adalah parameter keretakan, sehingga dibutuhkan hasil perhitungan yang lebih akurat. Oleh karena itu proses *running* dilaksanakan dengan menggunakan mode *fine mesh analysis* yang memiliki struktur kerekatan nodal elemen yang tinggi
3. Mengatur metode *mesh* menjadi elemen *tetrahedon* dengan ukuran tertentu. Dalam pelaksanaannya, elemen *mesh* harus dibuat cukup kecil untuk *output* yang lebih akurat, namun juga harus cukup besar agar mengurangi waktu komputasionalnya. Oleh karena itu digunakan elemen *mesh* dengan ukuran 300 mm.



Gambar III.18. *Face Sizing Mesh* dengan *Mode Tetrahedon*

4. Melakukan *face sizing* pada daerah sekitar retak (Gambar III.18). Hal tersebut dilakukan karena pada area sekitar retak harus dilaksanakan perhitungan yang lebih terperinci pada tiap elemen, sehingga tingkat akurasi perhitungan pada area sepanjang retakan menjadi lebih baik. Dengan demikian, maka ukuran *elemen size* yang diambil adalah 0.1 mm dengan *radius area* sebesar 7 mm.

Setelah proses *meshing* telah selesai, maka langkah selanjutnya adalah pengecekan kualitas elemen *mesh* terhadap pemodelan retak. Adapun langkah pengecekan tersebut dapat berupa pemeriksaan *mesh shape elemen* (peninjauan pembentukan matrik kekakuan element), pengecekan *aspect ratio* (perbandingan panjang sisi vertikal dan horisontal), penentuan nilai *tapered*, penentuan sudut kemiringan (*skew angle*), dan penentuan *warping* pada curved 3D *Shell*, terutama *double curvature*.

III.11. Penentuan Pembebanan dan Hasil *Running* pada Pemodelan Lokal

Setelah proses pemodelan *mesh* selesai, maka pekerjaan selanjutnya adalah implementasi penentuan skenario pembebanan (*loading condition*). Dalam Analisa perhitungan faktor intensitas tegangan dengan menggunakan *software finite element* (FEA), penentuan kondisi batas tidak dilaksanakan pada tiap *node* yang berada pada ujung retak, melainkan dengan pengekangan gaya aksial pada kedua ujung irisan pelat, yaitu pada luasan ketebalan ujung atas dan bawah pelat. Adapun langkah-langkah dalam penentuan scenario pembebanan pada model lokal adalah:

1. Menginput nilai tegangan normal kearah sumbu y sebesar 6.85 MPa melalui menu *pressure loads*. Dimensi objek yang diterapkan adalah luasan ketebalan atas dan bawah model dengan arah berlawanan.
2. Penentuan solusi yang dibutuhkan dalam perhitungan, yaitu nilai *Stress intensity factor* Mode 1 (K_I) melalui menu *fracture tools*.
3. Menentukan *parameter set* pada *solution* dengan variasi kedalaman dan Panjang retak yang dimulai dari asumsi ketebalan 0.5 mm hingga 14 mm. (Gambar III.19)

Outline of Schematic A8: Parameters			Table of Design Points						
	A	B		A	B	C	D	E	F
1	ID	Parameter Name	1	Name	P3 - Crack -Major Radius	P4 - Crack -Minor Radius	P5 - Crack Largest Contour Radius	P1 - SIFS (K _I) Maximum	P2 - SIFS (K _I) Minimum
2	Input Parameters		2	Units	mm	mm	mm	MPa mm ^{0.5}	MPa mm ^{0.5}
3	Static Structural (A1)		3	DP 0 (Current)	2	1	0.1	5.0807	3.9548
4	P3	Crack -Major Radius	4	DP 1	3	1.5	0.1	6.2625	4.7271
5	P4	Crack -Minor Radius	5	DP 2	4	2	0.1	7.2189	5.2518
6	P5	Crack Largest Cont.	6	DP 3	5	2.5	0.1	8.1203	5.7918
*	New input parameter	New name	7	DP 4	6	3	0.1	8.9991	6.2053
8	Output Parameters		8	DP 5	7	3.5	0.1	9.8952	6.7742
9	Static Structural (A1)		9	DP 6	8	4	0.1	10.628	7.2811
10	P1	SIFS (K _I) Maximum	10	DP 7	9	4.5	0.1	11.501	7.7442
11	P2	SIFS (K _I) Minimum	11	DP 8	10	5	0.1	12.327	8.2741
*	New output parameter		12	DP 9	11	5.5	0.1	12.987	8.8999
13	Charts		13	DP 10	12	6	0.1	13.803	9.387
			14	DP 11	13	6.5	0.1	14.587	10.033
			15	DP 12	14	7	0.1	15.488	10.547
			16	DP 13	15	7.5	0.1	16.398	11.213
			17	DP 14	16	8	0.1	17.106	11.754
			18	DP 15	17	8.5	0.1	17.842	12.32
			19	DP 16	18	9	0.1	18.456	12.721
			20	DP 17	19	9.5	0.1	19.065	13.629
			21	DP 18	20	10	0.1	19.743	14.323
			22	DP 19	21	10.5	0.1	20.033	14.902
			23	DP 20	22	11	0.1	20.517	15.598
			24	DP 21	23	11.5	0.1	21.995	16.039
			25	DP 22	24	12	0.1	22.21	16.657
			26	DP 23	25	12.5	0.1	23.263	16.854
			27	DP 24	26	13	0.1	24.394	16.98
			28	DP 25	27	13.5	0.1	25.174	16.812
			29	DP 26	1	0.5	0.1	3.598	2.7918
			*						

Gambar III.19. Perhitungan K_I melalui Menu *Parameter Set*

Setelah dilaksanakan proses *running* pada *Software Finite Element* (FEA), maka didapatkan variasi nilai *Stress intensity factor* (K_I) dengan acuan nilai kedalaman awal retak (a_o) yang dimulai dari 0.5 mm hingga ketebalan pelat (a_f), yaitu 14 mm. Hasil dari proses *running software* tersebut akan dibandingkan dengan perhitungan matematis melalui Persamaan II.79.

III.12. Analisa Pehitungan Laju Penjalaran Retak dan Umur Kelelahan

Setelah menentukan nilai *Stress intensity factor* (K_I), maka dilaksanakan perhitungan kecepatan penjalaran retak. Melalui konsep *fracture mechanics*, laju perambatan retak dinyatakan dengan variable da/dN yang merupakan fungsi dari sifat material, panjang retak, faktor geometri, dan tegangan operasi. Adapun perhitungan laju perambatan retak dapat ditentukan melalui Persamaan II.80.

Perbandingan batas kelelahan struktur dengan beban tarik dinamis pada penelitian ini dinyatakan dalam jumlah siklus N . Dengan menggunakan Persamaan P.C. Paris - Erdogan, maka umur kelelahan dan kegagalan suatu struktur dapat diperkirakan melalui penjumlahan siklus. Untuk memperkirakan umur lelah suatu komponen, maka harus diketahui terlebih dahulu harga C dan m . Harga C dan m didapat melalui pengujian komponen material, dalam hal ini ialah material baja ASTM A36 – *Structural Steel*.

$$\Delta N = \frac{\Delta a}{[da/dN]} \quad (III.3)$$

Jika nilai penjalaran retak telah diketahui, maka nilai da/dN dapat dikonversi kedalam bentuk rentang siklus ΔN . Melalui perhitungan Persamaan III.3, rentang siklus dihitung berdasarkan perbandingan rentang kedalaman retak dengan laju perambatan retak. Dengan menentukan nilai siklus awal (N_0) sebesar 0, maka perhitungan total siklus dapat dilaksanakan melalui penjumlahan siklus. Penjumlahan tersebut dilaksanakan dengan cara pada setiap akhir pertambahan retak, siklus initial (N_i) dijumlahkan dengan rentang siklus sebelumnya (ΔN), sehingga jumlah siklus pada panjang retak kritis merupakan jumlah total dari siklus pembebanan. (Persamaan III.4)

$$N_p = \Delta N + N_i \quad (III.4)$$

Setelah menentukan jumlah total nilai siklus, maka dihitung periode gelombang pada tiap siklus dan perhitungan umur kelelahan struktur. Dengan menggunakan Persamaan R. Bhattacharyya, Ed., maka dapat dilaksanakan perhitungan umur konstruksi melalui Persamaan III.5 dan III.6.

$$T_e = \frac{L_W}{V_W - V \cos \mu} \quad (III.5)$$

$$F = N_p T_e \quad (III.6)$$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

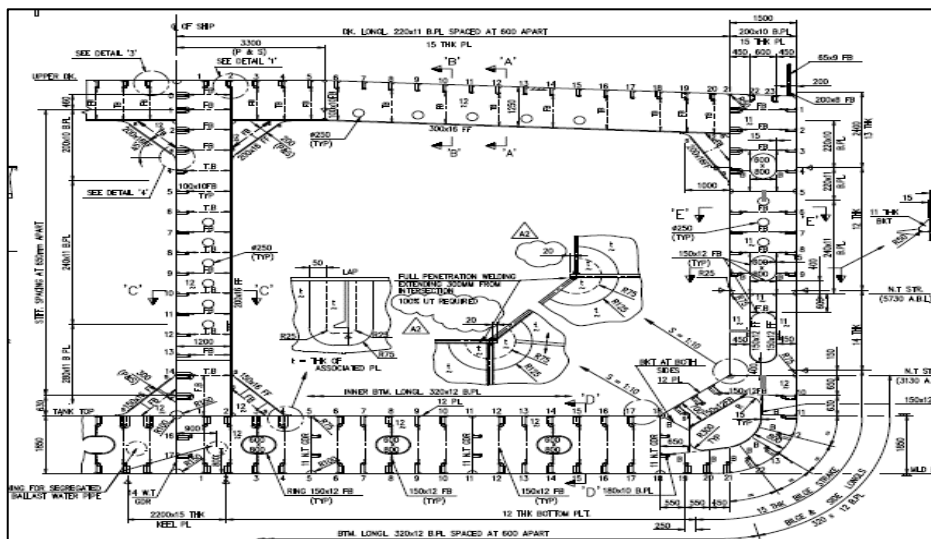
IV.1. Data Struktur

Struktur yang digunakan pada Penelitian ini adalah Data Kapal *Tanker* 17500 DWT tipe *double hull* dengan satu *centerline bulkhead*. Adapun ukuran utama Kapal *Tanker* dapat dilihat pada Tabel IV.1.

Tabel IV.1. Data Kapal Tanker 17500 DWT
(Sumber: PT Daya Radar Utama Persero, 2016)

Main Dimension	Abb.	Size	Unit
<i>Length between Perpendiculars</i>	LBP	149.5	M
<i>Breadth</i>	B	27.7	M
<i>Depth</i>	D	12	M
<i>Draught</i>	T	7	M
<i>Speed</i>	Vo	13	Knot
<i>Coefficient Block</i>	Cb	0.837	
<i>Deadweight</i>	DWT	17500	Ton

Sedangkan dimensi komponen struktur Kapal *Tanker* dapat dilihat pada Gambar IV.1 yang menunjukkan *Midship Section* Kapal Tanker.



Gambar IV.1. *Midship Section* Kapal Tanker 17500 DWT
(Sumber: PT Daya Radar Utama Persero, 2016)

IV.2. Data Lingkungan

Daerah operasional dari Kapal *Tanker* tentunya harus diketahui terlebih dahulu, dimana hal tersebut termasuk ke dalam data lingkungan. Data ini digunakan untuk menganalisa kekuatan struktur, baik dari segi kelayakan, kekuatan, keandalan untuk beroperasi, maupun umur konstruksi di lingkungan tertentu. Berdasarkan Jurnal STTAL pada Tahun 2016, maka data gelombang air laut dapat dilihat melalui Tabel IV.2.

Tabel IV.2. Besaran Nilai Gelombang Signifikan di Perairan Indonesia Per Musim

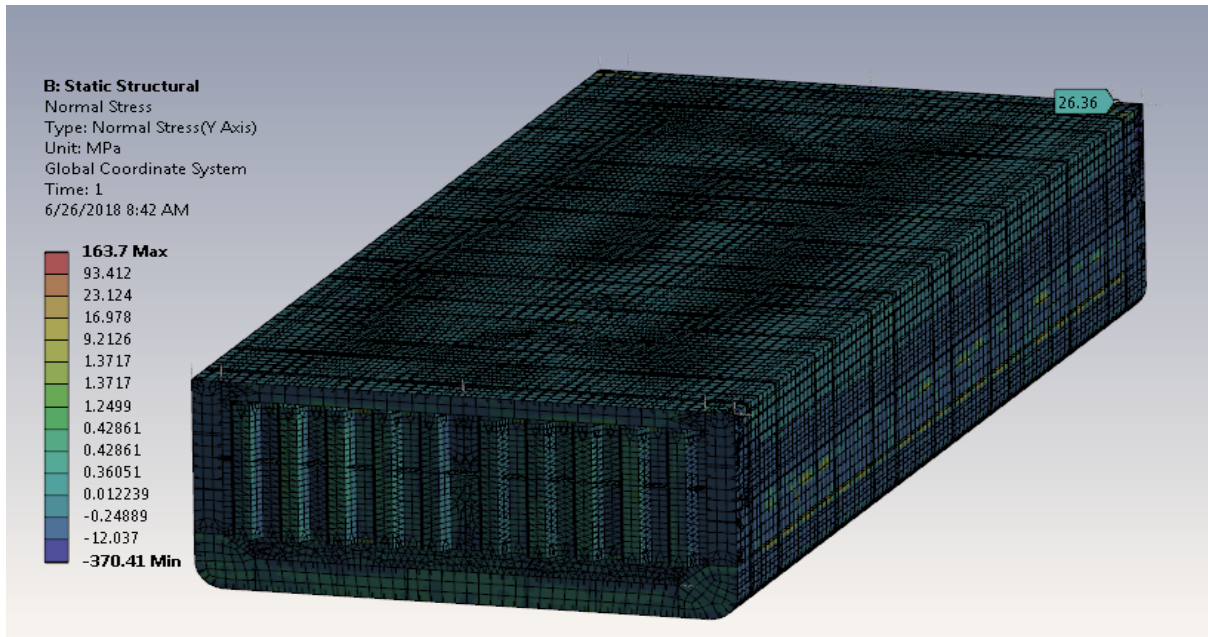
(Sumber: STTAL, 2016)

no.	Lokasi	Musim Barat		Musim Timur	
		Panjang Gelombang (m)	Tinggi Gelombang (m)	Panjang Gelombang (m)	Tinggi Gelombang (m)
1	Laut Jawa	120	3	120	2.5
2	Laut Arafuru	210	3.5	120	3
3	Selat Karimata	210	3.5	120	1.5
4	Selat Makassar	270	2	210	1.5
5	Perairan Selatan Jawa	360	4	450	6

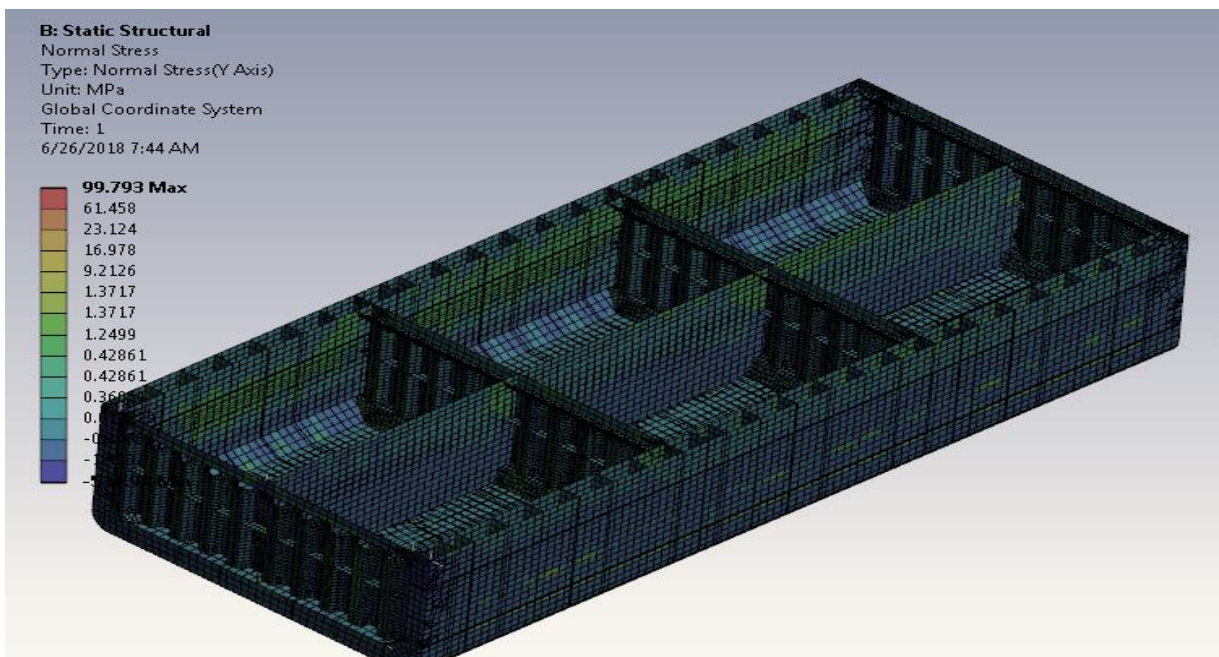
Berdasarkan Tabel IV.2 dapat diketahui bahwa kondisi perairan laut di wilayah Indonesia per musim memiliki nilai gelombang terbesar pada Perairan Selatan Jawa dan gelombang terkecil pada Selat Makasar. Namun karena Kapal Tanker 17500 beroperasi disekitar perairan Laut Jawa, maka nilai yang diambil dalam perhitungan adalah perairan laut jawa dengan panjang gelombang sekitar 120 m dan tinggi 3m. Sehingga, dengan menggunakan Persamaan Bhattacharyya didapatkan periode gelombang sebesar 5.55 s.

IV.3. Analisa Tegangan pada Model Global

Berdasarkan Regulasi CSR-T Appendix B mengenai penentuan tegangan struktur, konstruksi kapal harus dimodelkan ke dalam model tiga ruang muat. Melalui pemodelan tersebut, maka akan didapatkan beberapa variasi tegangan. Untuk menentukan variabel penjaran retak, maka dapat digunakan variasi nilai tegangan normal maksimum. Tegangan tersebut akan menentukan arah penjaran retak melalui sumbu x, y, atau z, sehingga dapat diketahui karakteristik laju perambatan retak sesuai dengan arah yang ditentukan. Selain itu, karena penyebab keretakan yang terjadi adalah beban siklik akibat *fatigue*, maka harus ditentukan terlebih dahulu rentang tegangan ($\sigma_1 - \sigma_2$) yang terjadi pada struktur. Nilai rentang tegangan tersebut dapat diasumsikan melalui kondisi sagging dan hogging pada kapal.



Gambar IV.2. Tegangan Normal Maksimum pada Kondisi *Sagging*

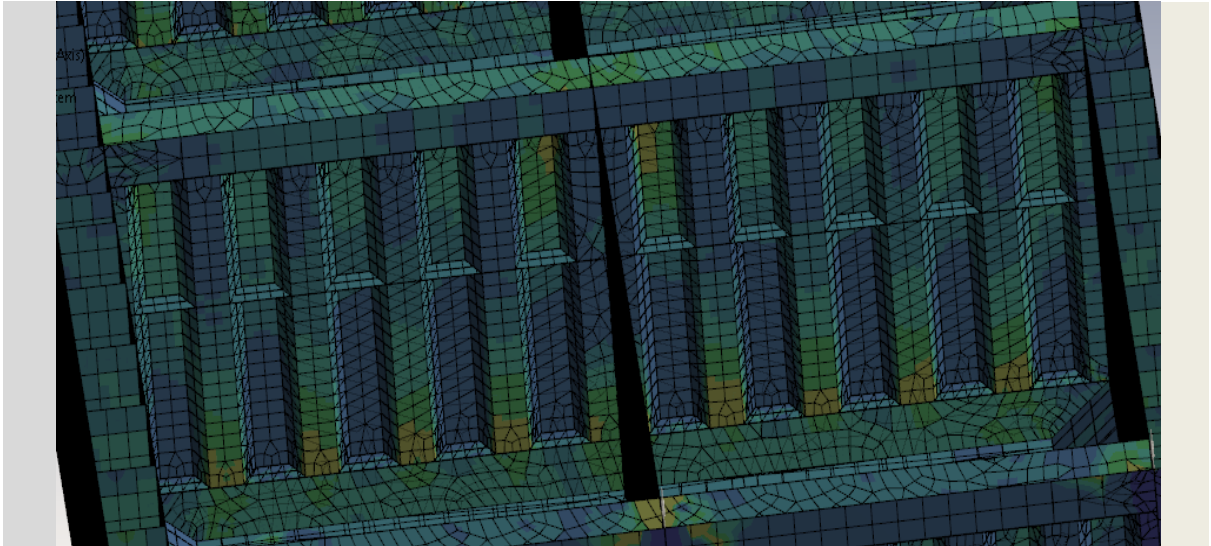


Gambar IV.3. Tegangan Normal Maksimum pada Kondisi *Hogging*

Berdasarkan hasil analisa *Software finite elementt* (FEA) yang tertera pada Gambar IV.2 dan IV.3, maka dapat diketahui bahwa nilai tegangan normal maksimum pada saat kapal mengalami kondisi *sagging* dan *hogging* masing-masing adalah sebesar 163,70 MPa dan 99,79 MPa. Hal tersebut menunjukkan bahwa kondisi struktur telah memenuhi standar kekuatan desain dikarenakan nilai tegangan normalnya tidak lebih besar dari nilai tegangan *yield* material, yaitu sebesar 250 MPa.

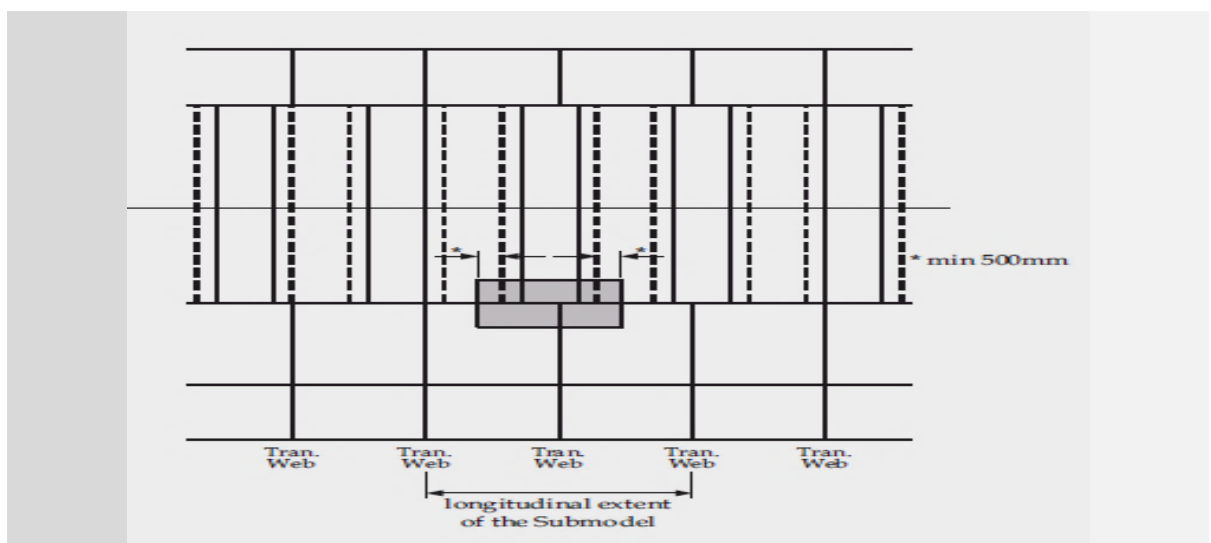
IV.4. Analisa Tegangan pada Sekat Ruang Muat

Analisa struktur sekat ruang muat Kapal Tanker 17500 DWT dilaksanakan pada Sekat Ruang muat Frame 100, sehingga melalui *software finite element* (FEA) didapatkan gambar fotoelastis yang dapat dilihat pada Gambar II.4.



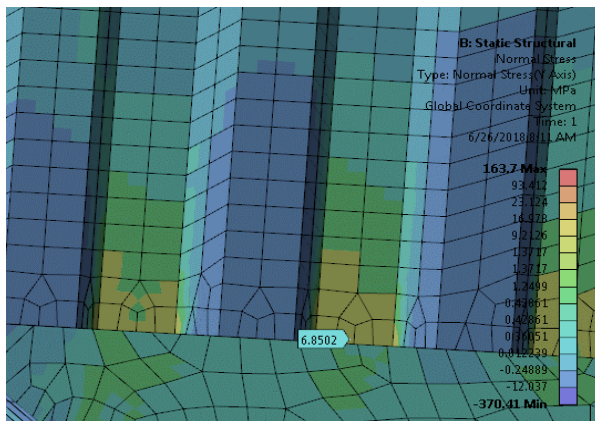
Gambar IV.4. Fotoelastis Sekat Tiga Ruang Muat Kapal

Gambar IV.4. menunjukkan bahwa letak tegangan normal maksimum pada model terjadi pada daerah sambungan antarap *lower stool* dengan *corrugated bulkhead*. Hal tersebut telah sesuai dengan pernyataan Regulasi CSR-T Appendix C yang mengatakan bahwa daerah kritis *fatigue* sering terjadi pada daerah sambungan las antar *lower stool* dengan *corrugated bulkhead*. (Gambar IV.5)

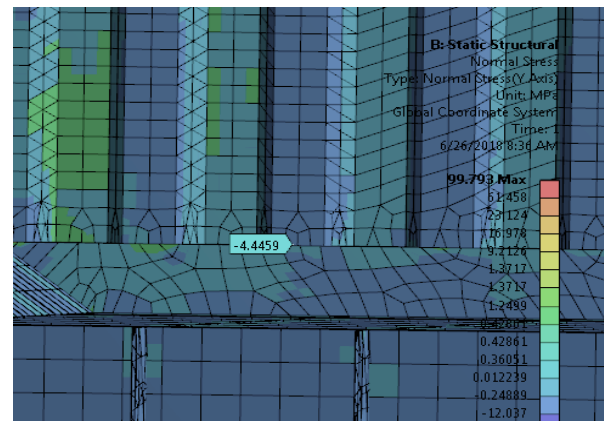


Gambar IV.5. Area Hotspot Sekat Ruang Muat menurut CSR-T
(Sumber: Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers, 2015)

Dengan demikian, maka area tersebut dapat digunakan untuk proses perhitungan penjaralan retak pada material. Karena posisi *crack* berada pada jalur pengelasan antara Sekat *Corrugated* dengan *Lower stool*, maka tegangan yang digunakan untuk proses analisis ialah tegangan normal maksimum searah sumbu y.



Gambar IV.7. Struktur Kekuatan Sekat Ruang Muat Kapal pada Saat Kondisi *Sagging*



Gambar IV.6. Struktur Kekuatan Sekat Ruang Muat Kapal pada Saat Kondisi *Hogging*

Gambar IV.6 dan IV.7 menunjukkan bahwa nilai tegangan normal maksimum ke arah sumbu y pada sekat ruang muat Kapal *Tanker* adalah sebesar 6.850 MPa untuk kondisi *sagging* dan -4.446 MPa untuk kondisi *hogging*. Sehingga nilai rentang tegangan ($\sigma_1 - \sigma_2$) dalam proses analisa perhitungan penjaralan retak sebesar 6.850 MPa.

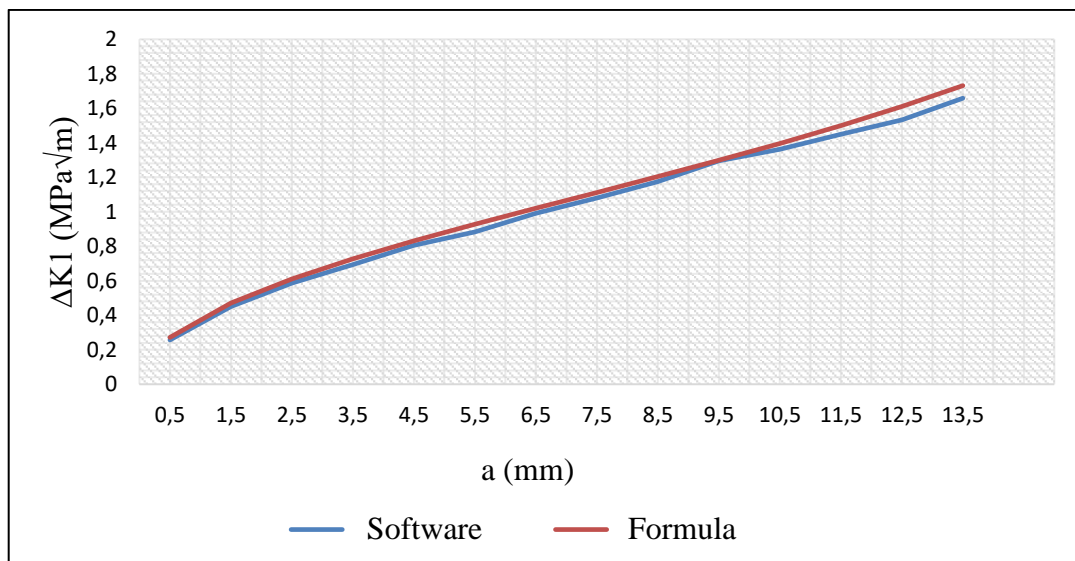
IV.5. Analisa Penentuan parameter K_I

Setelah menentukan nilai tegangan normal maksimum pada sekat ruang muat, maka nilai tersebut dapat digunakan untuk pemodelan keretakan pada sambungan antara *lower stool* dengan *corrugated plate*. Melalui pemodelan sub-lokal tersebut, nilai *stress intensity factor* mode I (K_I) dapat ditentukan dengan memvariasikan kedalaman retak suatu struktur. Pemilihan nilai ketebalan retak awal (a_o) diambil 0.5 mm dengan mengacu pada standar *Rule American Bureau of Shipping* (ABS). Sedangkan nilai kedalaman retak akhir (a_f) diambil sebesar ketebalan pelat karena retak yang terjadi diasumsikan *through thickness crack*.

Perhitungan nilai *Stress Intensity Factor* mode I (K_I) diambil melalui data model keretakan pada node disekitar ujung keretakan (*crack tip*). Melalui node tersebut, maka dapat diketahui nilai $K_{I_{max}}$ dan $K_{I_{min}}$ melalui garis kontur yang diperoleh melalui perhitungan *Software Finite Element* (FEA). Selain itu analisa K_I juga dapat ditentukan melalui perhitungan rumus empiris untuk mengetahui perbandingan diantara keduanya.

Tabel IV.3. Perhitungan ΔK_I pada Material

no.	a_0 (mm)	c (mm)	B	ΔK_I (MPa $\sqrt{\text{mm}}$)		ΔK_I (MPa $\sqrt{\text{m}}$)	
				Software	Formula	Software	Formula
1	0,5	1	1,000237	7,411056	8,587486	0,256591	0,27156
2	1,5	3	1,002137	13,04451	14,90222	0,451637	0,47125
3	2,5	5	1,005968	16,91414	19,31222	0,585614	0,61071
4	3,5	7	1,011791	20,61113	22,9828	0,693003	0,72678
5	4,5	9	1,019702	23,95611	26,26382	0,805471	0,83053
6	5,5	11	1,029836	27,05158	29,32429	0,882498	0,92732
7	6,5	13	1,042369	30,38355	32,26683	0,991196	1,02037
8	7,5	15	1,05753	34,15678	35,16427	1,080132	1,11199
9	8,5	17	1,075612	37,16382	38,0753	1,175223	1,20405
10	9,5	19	1,096984	39,71238	41,05258	1,295528	1,2982
11	10,5	21	1,122117	41,72699	44,14798	1,36125	1,39608
12	11,5	23	1,151609	45,81383	47,41679	1,44876	1,49945
13	12,5	25	1,186234	48,45491	50,92178	1,532279	1,61029
14	13,5	27	1,227003	52,43693	54,73821	1,658201	1,73097

Gambar IV.8. Perhitungan ΔK_I pada Material

Tabel IV.3 dan Gambar IV.8 menunjukkan variasi ΔK_I terhadap kedalaman awal retak. Dalam pelaksanaan aplikasi pembebanan terhadap pemodelan retak, nilai ΔK_I semakin bertambah seiring dengan kedalaman awal retak. Hal tersebut dibuktikan bila kedalaman retak awal sebesar 0,5 m, maka nilai ΔK_I sebesar 0.256 MPa $\sqrt{\text{m}}$, sedangkan jika kedalaman awal retak (a_0) sebesar 1,5 mm, maka nilai ΔK_I menjadi sebesar 0.452 MPa $\sqrt{\text{m}}$. Sehingga dapat disimpulkan bahwa melalui Grafik a - ΔK_I , retak menjalar seiring dengan pertambahan panjang kedalaman retak awal.

IV.6. Analisa Perhitungan penjalaran retak

Setelah menentukan factor intensitas tegangan, maka dapat ditentukan *variable* laju perambatan retak (da/dN) dan *Number of Cycle* melalui hasil perhitungan ΔK . Namun untuk menentukan parameter yang lain, seperti konstanta C dan m , maka harus dilakukan terlebih dahulu dilaksanakan pengujian pada material. Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan oleh Hirt and Fisher pada Baja ASTM A36, maka didapatkan nilai C dan m masing-masing sebesar 2.0×10^{10} dan 3. Sehingga berdasarkan konstanta tersebut didapatkan hasil perhitungan da/dN yang dapat dilihat pada Tabel IV.4.

Tabel IV.4. Perhitungan Analisa Laju Perambatan Retak

no.	a_o (mm)	a_f (mm)	Δa (mm)	C	M	da/dN (m/cycle)	ΔN (cycle)	N (cycle)
1	0,5	1,5	1	2,00E+10	3	8,14E-09	1,2E+08	122837128
2	1,5	2,5	1	2,00E+10	3	4,44E-08	2,3E+07	145363273
3	2,5	3,5	1	2,00E+10	3	9,68E-08	1E+07	155696129
4	3,5	4,5	1	2,00E+10	3	1,75E-07	5710375	161406504
5	4,5	5,5	1	2,00E+10	3	2,75E-07	3636815	165043319
6	5,5	6,5	1	2,00E+10	3	3,96E-07	2525759	167569079
7	6,5	7,5	1	2,00E+10	3	5,61E-07	1782602	169351681
8	7,5	8,5	1	2,00E+10	3	7,97E-07	1254698	170606379
9	8,5	9,5	1	2,00E+10	3	1,03E-06	974112	171580492
10	9,5	10,5	1	2,00E+10	3	1,25E-06	798348	172378839
11	10,5	11,5	1	2,00E+10	3	1,45E-06	688207	173067046
12	11,5	12,5	1	2,00E+10	3	1,92E-06	519972	173587019
13	12,5	13,5	1	2,00E+10	3	2,28E-06	439498	174026516
14	13,5	14	0,5	2,00E+10	3	2,88E-06	173392	174199908

Berdasarkan Tabel IV.4 dapat diketahui bahwa semakin besar nilai kedalaman retak, maka nilai laju perambatan retak akan semakin besar. Hal tersebut telah sesuai dengan pernyataan Hukum Paris - Erdogan yang menyatakan bahwa semakin besar nilai kedalaman retak, maka laju perambatan retak akan semakin cepat. Selain itu dapat disimpulkan pula bahwa semakin besar nilai kedalaman retak.

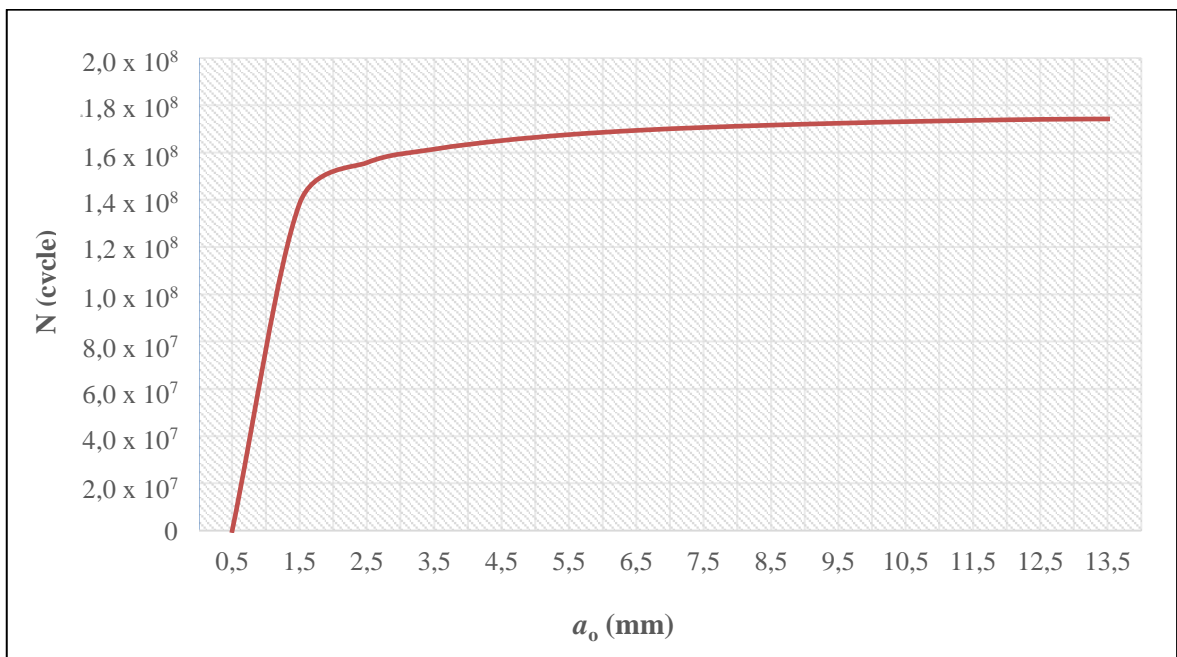
IV.7. Analisa perhitungan *Fatigue* pada material

Sebelum menentukan umur kelelahan struktur, maka harus ditentukan terlebih dahulu nilai periode gelombang pada material. Melalui perhitungan Persamaan Battacharya, maka didapatkan nilai T_e sebesar 5.55 s. Dengan demikian, maka analisa *fatigue* dapat dihitung melalui keretakan awal model sebesar 0.5 mm, 1.5 mm, dan 2.5 mm sebagai berikut:

a. Perhitungan *fatigue* untuk kedalaman retak awal 0,5 mm

Tabel IV.5. Perhitungan *Fatigue* untuk Kedalaman Retak Awal 0,5 mm

no.	a_o (mm)	a_f (mm)	Δa (mm)	da/dN (m/cycle)	ΔN (cycle)	N (cycle)	F (s)
1	0,5	1,5	1	8,1409E-09	1,23E+08	122837128	686629979
2	1,5	2,5	1	4,4393E-08	22526146	138363273	812545712
3	2,5	3,5	1	9,6779E-08	10332856	155696129	870303889
4	3,5	4,5	1	1,7512E-07	5710375	161406504	902223512
5	4,5	5,5	1	2,7497E-07	3636815	165043319	922552433
6	5,5	6,5	1	3,9592E-07	2525759	167569079	936670819
7	6,5	7,5	1	5,6098E-07	1782602	169351681	946635136
8	7,5	8,5	1	7,97E-07	1254698	170606379	953648599
9	8,5	9,5	1	1,0266E-06	974112,3	171580492	959093652
10	9,5	10,5	1	1,2526E-06	798347,9	172378839	963556225
11	10,5	11,5	1	1,4531E-06	688206,8	173067046	967403135
12	11,5	12,5	1	1,9232E-06	519972,3	173587019	970309655
13	12,5	13,5	1	2,2753E-06	439497,8	174026516	972766342
14	13,5	14	0,5	2,8836E-06	173391,6	174199908	973735559



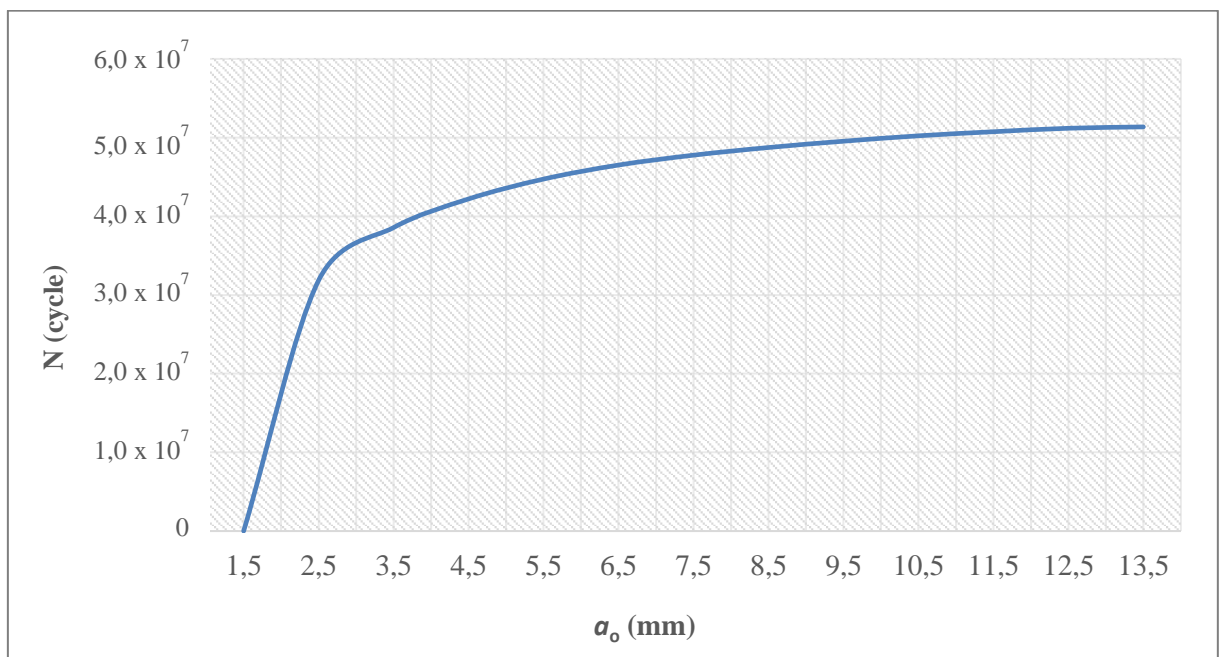
Gambar IV.9. Perhitungan *Fatigue* untuk Kedalaman Retak Awal 0.5 mm

Tabel IV.5 dan Gambar IV.9 menunjukkan bahwa umur konstruksi sekat ruang muat didapatkan melalui perhitungan N pada tiap periode gelombang, sehingga untuk kedalaman awal retak (a_o) sebesar 0,5 mm, maka akan menghasilkan nilai *fatigue* kurang lebih sebesar 973735559,442 s atau 30,88 tahun.

b. Perhitungan *fatigue* untuk kedalaman retak awal 1,5 m.

Tabel IV.6. Perhitungan *Fatigue* untuk Kedalaman Retak Awal 1,5 mm

no.	a_o (mm)	a_f (mm)	Δa (mm)	da/dN (m/cycle)	ΔN (cycle)	N (cycle)	F (s)
1	1,5	2,5	1	4,4393E-08	22526146	22526145,7	125915733
2	2,5	3,5	1	9,6779E-08	10332856	31859001,5	183673910
3	3,5	4,5	1	1,7512E-07	5710375	38569376,7	215593533
4	4,5	5,5	1	2,7497E-07	3636815	42206191,7	235922453
5	5,5	6,5	1	3,9592E-07	2525759	44731951	250040840
6	6,5	7,5	1	5,6098E-07	1782602	46514553,1	260005157
7	7,5	8,5	1	7,97E-07	1254698	47769251,6	267018620
8	8,5	9,5	1	1,0266E-06	974112,3	48743363,9	272463673
9	9,5	10,5	1	1,2526E-06	798347,9	49541711,8	276926245
10	10,5	11,5	1	1,4531E-06	688206,8	50229918,6	280773156
11	11,5	12,5	1	1,9232E-06	519972,3	50749890,9	283679676
12	12,5	13,5	1	2,2753E-06	439497,8	51189388,7	286136363
13	13,5	14	0,5	2,8836E-06	173391,6	51362780,3	287105580



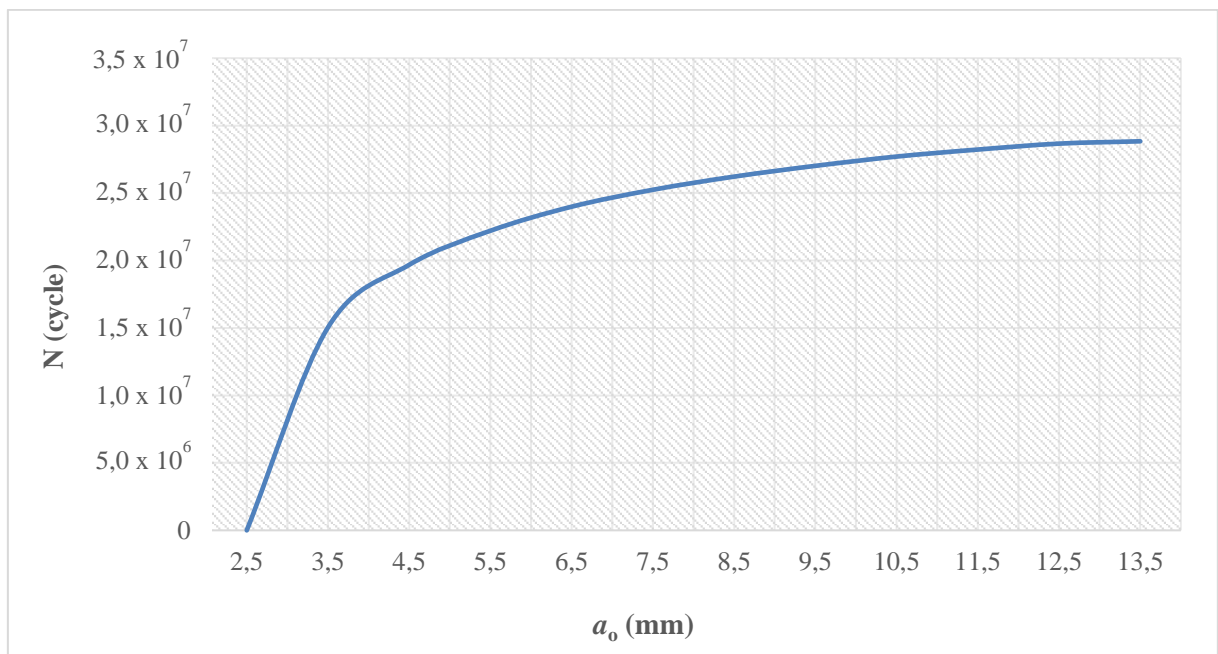
Gambar IV.10. Perhitungan *Fatigue* untuk Kedalaman Retak Awal 1.5 mm

Berdasarkan Tabel IV.6 dan Gambar IV.10 menunjukkan bahwa umur konstruksi sekat didapatkan melalui perhitungan siklus (N) pada tiap periode gelombang, sehingga untuk kedalaman awal retak (a_0) 1.5 mm, maka akan menghasilkan nilai *fatigue* kurang lebih sebesar 287105580,2 s atau 9,10 tahun.

c. Perhitungan *fatigue* untuk kedalaman retak awal 2,5 mm

Tabel IV.7. Perhitungan *Fatigue* untuk Kedalaman Retak Awal 2,5 mm

no.	a_o (mm)	a_f (mm)	Δa (mm)	da/dN (m/cycle)	ΔN (cycle)	N (cycle)	F (s)
1	2,5	3,5	1	9,6779E-08	10332856	10332855,7	57758177
2	3,5	4,5	1	1,7512E-07	5710375	15043231	89677800
3	4,5	5,5	1	2,7497E-07	3636815	19680046	110006720
4	5,5	6,5	1	3,9592E-07	2525759	22205805,2	124125107
5	6,5	7,5	1	5,6098E-07	1782602	23988407,4	134089424
6	7,5	8,5	1	7,97E-07	1254698	25243105,9	141102886
7	8,5	9,5	1	1,0266E-06	974112,3	26217218,1	146547940
8	9,5	10,5	1	1,2526E-06	798347,9	27015566,1	151010512
9	10,5	11,5	1	1,4531E-06	688206,8	27703772,9	154857423
10	11,5	12,5	1	1,9232E-06	519972,3	28223745,2	157763943
11	12,5	13,5	1	2,2753E-06	439497,8	28663243	160220630
12	13,5	14	0,5	2,8836E-06	173391,6	28836634,6	161189847



Gambar IV.11. Perhitungan *Fatigue* untuk Kedalaman Retak Awal 2.5 mm

Berdasarkan Tabel IV.7 dan Gambar IV.11 menunjukkan bahwa umur konstruksi sekat ruang muat didapatkan melalui perhitungan N pada tiap periode gelombang dinamis, sehingga untuk kedalaman awal retak (a_o) sebesar 2.5 mm, maka akan menghasilkan nilai *fatigue* sebesar 161189847,079 s atau 5.11 tahun.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1. Kesimpulan

Setelah dilaksanakan analisa melalui *software finite element* dan perhitungan matematis, maka kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Semakin dalam retak awal atau *initial crack* suatu struktur, maka nilai faktor intensitas tegangan (K_I) akan semakin besar. Hal tersebut membuktikan bahwa pada material tersebut telah terjadi penjararan retak secara bertahap.
2. Semakin dalam retak awal atau *Initial Crack* konstruksi sekat ruang muat, maka laju penjararan retak akan semakin besar. Hal tersebut dibuktikan melalui perambatan retak yang melaju sebesar 8.14×10^{-9} m/cycle pada saat kedalaman awal retak berukuran 0.5 mm. sedangkan pada saat kedalaman retak berukuran 1.5 mm dan 2.5 mm, maka nilai laju perambatan retak-nya masing-masing sebesar 4.44×10^{-8} m/cycle dan 9.68×10^{-8} m/cycle.
3. Semakin dalam retak awal atau *Initial Crack* konstruksi sekat ruang muat, maka nilai *fatigue life*-nya akan semakin rendah. Hal tersebut dibuktikan melalui perhitungan kedalaman awal keretakan yang berukuran 0.5 mm, maka umur konstruksi sekat sebesar 30.88 tahun. Sedangkan jika kedalaman awal retak berukuran 1.5 mm, maka umur konstruksi sekat menjadi 9.10 tahun. Dan apabila kedalaman awal retak berukuran 2.5 mm, maka umur konstruksi menjadi 5.11 mm.

V.2. Saran

Analisis umur kelelahan sekat ruang muat melalui perhitungan *stress intensity factor* (K_I) hanya dilakukan pada mode I (*opening crack*), sehingga pembebanan yang dilakukan hanya pembebanan aksial. Untuk itu perlu dilakukan pembebanan *in-plane bending* dan *out-plane bending* (mode II) karena retak pada struktur bisa diakibatkan oleh kombinasi ketiga mode pembebanan pada struktur.

Analisis perhitungan penjararan retak dan *Number of Cycle* melalui metode *fracture mechanic* masih menggunakan perhitungan yang bersifat global. Sehingga perlu dikaji lagi ketelitian perhitungan melalui metode lain yang lebih kompleks, seperti pada perhitungan *Linear-Elastic Fracture Mechanic* (LEFM) atau *Elastic-Plastic Fracture Mechanic* (EPFM)

` Dalam perhitungan maupun model ANSYS, *crack* di asumsikan *semi-elliptical crack* (*surface crack*). Padahal *crack* terdiri dari beragam jenis, seperti: Retak tengah menjalar (*through center crack*), retak tepi satu sisi (*single edge crack*), retak tepi di dua sisi (*double – edge crack*), dll. Maka dari itu, perlu dilakukan analisa lebih lanjut berikutnya dengan mempertimbangkan variasi dari bentuk *crack*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdi, Khusnul. (2012). S.T. Thesis. *Analisa Umur Kelelahan Pada Bottom Plate FPSO Dengan Metode Elastic Plastic Frature Mechanics Berbasis Keandalan*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Andersen, M.R. (1998). *Fatigue Crack Initiation and Growth in Ship Structure. Thesis Department of Naval Architech and Offshore Engineering*. Denmark: Technical University of Denmark.
- Anshari, H., S. (2010). S.T. Thesis. *Karakteristik Laju Perambatan Retak Fatik Bahan Komposit Berpenguat Serat Kenaf Dengan Matrik Polyester*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret
- Bazant, Zdenek. (1992). *Fracture Mechanics of Concrete Structures*. Milton Park, UK: Taylor & Francis Group.
- Beer, F. and Johnston, E.R. (1984). *Vector mechanics for engineers: statics*. New York City, US: McGraw Hill
- Broek, D. (1987). *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. USA: Kluwer Academic Publisher.
- CFD Online. (2005, September 22). *Dimension (2D, 3D or 2.5D)*. Retrived July 18, 2018, from CFD Online Website: <https://www.cfd-online.com/About/>
- Chakrabarti, S.K. (1987). *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Boston: Computational Mechanics Publications Southampton
- Chakrabarti, S.K. (1987). *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Southampton, UK: Computational Mechanics Publications
- Desai, Chandrakant. (1979). *Basics of Finite Element Method*. In Wirjosoedirdjo, Sri Jatno (Ed.). *Dasar-dasar metode elemen – hingga*. Jakarta
- Eyres, D., J. (2007). *Ship Construction* (6th ed.). Amsterdam, NL: Elsevier
- Faulkner, D., (2001). *An Analytical Assessment of the Sinking of the M.V. Derbyshire*, Royal Institution of Naval Architects, pp.19-76

- Forsyth, P.J.E. (1962). *A Two Stages Process of Fatigue Crack Growth*, in Proceedings Crack Propagation Symposium, Cranfield College of Aeronautics, Cranfield, UK, pp. 76-94.
- Gupta, A. and Singh, R. P. (1986). *Fatigue Behaviour of Offshore Structures*. In Brebbia, C.A. and Orszag, S. A. (Ed.), *Fatigue Behaviour of Offshore Structures*. New Delhi.
- Hall, Stanley. (1969). *An introduction to the mechanics of solids: stresses and deformation in bars*. Milton, AT: J. Wiley and Sons Australasia PTY
- Husaini. (2006). *Perilaku Retak Aluminium Paduan A6061-T6 pada Pembebanan Mixed Mode*. Banda Aceh: Universitas Syiah Kuala.
- International Association of Classification Societies (IACS). (Consolidated Edition 2015). *Rules for The Survey and Construction of Steel Ships, Part CSR-T*. London: IACS Publishing
- International Association of Classification Societies. (2003). *Hull Terms & Hull Survey Terms*. London: IACS Publishing.
- Krammer, David. (2014). *Slip Fronts at Frictional Interfaces: A Numerical and Theoretical Study*. Palaiseau, FRA: École Polytechnique
- Liu, Alan. (2005). *Mechanics and Mechanisms of Fracture: An Introduction*. Almere, NL: ASM International.
- Logan, D. L. (2011). *A First Course in the Finite Element Method*. Boston, UK: Cengage Learning
- Luis. (2015, December 20). *Ini Kesaksian ABK Detik-Detik Tenggelamnya KM Marina Baru 2B*. Retrived July 18, 2018, from Zonasultra Website: <https://zonasultra.com/ini-kesaksian-akb-detik-detik-tenggelamnya-km-marina-baru-2b.html>
- Moaveni, Saeed. (1999). *Finite Element Analysis: Theory and Application with Ansys*. New Jersey, US: Prentice Hall
- Murdjito. (1996). *Diklat Pengantar Bangunan Lepas Pantai, Kursus Segitiga Biru ITS - Unhas – Unpati*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Newman, J.C. and Piascik, R. S. (2000). *Fatigue Crack Growth Thresholds, Endurance Limits, and Design*. Hampton, US: Langley Research Center

- Newman, J.C. and Raju, I. S. (1984). *Stress-intensity Factor Equations for Cracks in Three-dimensional Finite Bodies Subjected to Tension and Bending Loads*. Hampton, US: Langley Research Center
- Ochsner, Andreas. (2016). *Continuum Damage and Fracture Mechanics*. Southport, AU: Griffith University
- Okumoto, Y. (2009). *Design of Ship Hull Structures: A Practical Guide for Engineers*. Springer, 2008. Berlin, DE: Springer-Verlag
- Popov, E. P. (1978). *Mechanics of Material, 2 nd edition, Prentice-Hall, Inc.* In Z. Astaman (Ed.), *Mekanika Teknik, Edisi Kedua*. Jakarta.
- Raharjo, T., E. (2012). S.T. Thesis. *Analisa Perambatan Retak Pada Bagian Poros KM. Surya Tulus Akibat Torsi Dengan Metode Elemen Hingga*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Rajendran, V., Marikani, A. (2004). *Material Science*. New York, US: Tata McGraw-Hill Education.
- Rianto. (2011, November 28). *Tenggelamnya KM.Dumai Express 10*. Retrived July 17, 2018, from My First Blog website: <http://trihadirianto.blogspot.com/2011/11/tenggelamnya-kmdumai-express-10.html>
- Rudin, Qudhori. (2015). S.T. Thesis. *Analisis Fatigue Life Struktur Akibat Misalignment Pada Sambungan Pelat*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut (STTAL). (2016). *Jurnal Chart Datum, Program Studi SI Hidrografi*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sarjana
- Silva, Clarence. (2014). *Mechanics of Materials*. Boca Raton, US: CRC Press
- Sugianto, E. And Setyawan, D. (2012). S.T. Thesis. *Analisa Perkiraan Umur pada Cross Deck Kapal Ikan Katamaran 10 GT Menggunakan Metode Fracture Mechanics Berbasis Metode Elemen Hingga*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sun, C.T. and Kwon, S.W. (2000). *Characteristics of Three -Dimensional Stress Fields in Plates with a Through-the-Thickness Crack*. International Journal of Fracture. 291-315.
- Suresh, S. (1998). *Fatigue of Materials (second Edition)*. Cambridge, UK: Presh Syndicate of The University of Cambridge

Utomo, Agus. (2008). *Prinsip-prinsip dasar Metode Elemen Hingga*. Jakarta: Universitas Indonesia

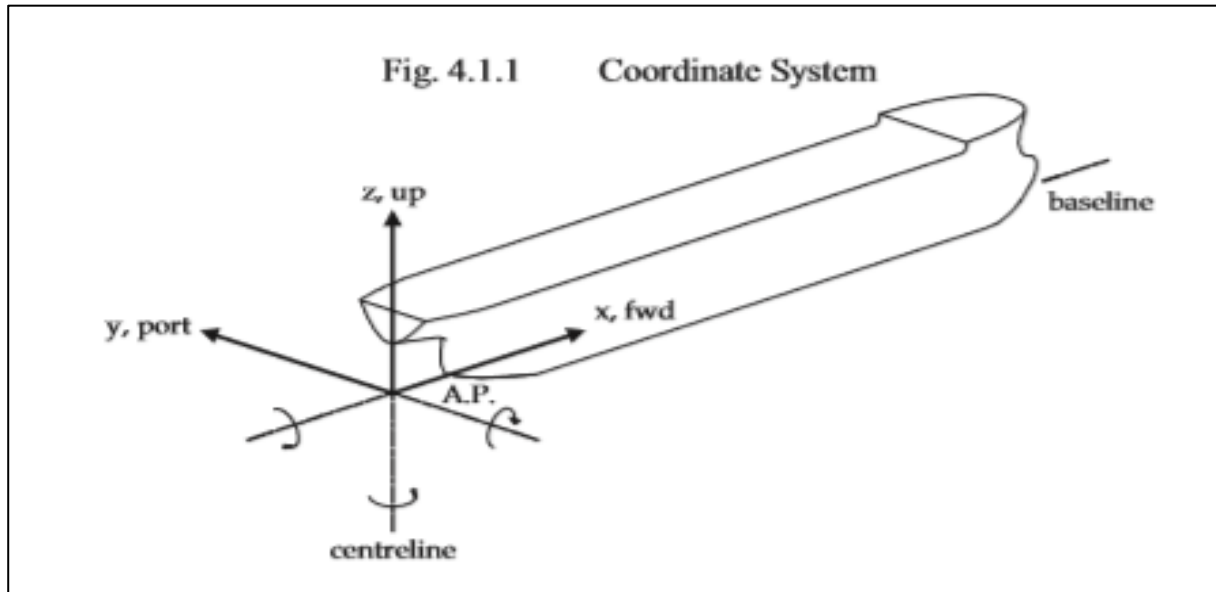
Vince, gaia. (2003, August 27). *Prestige oil spill far worse than thought*. Retrived July 17, 2018, from Newscientist website: <https://www.newscientist.com/article/dn4100-prestige-oil-spill-far-worse-than-thought/>

LAMPIRAN A
PERHITUNGAN BEBAN KAPAL

Tabel Perhitungan Beban Pada Setiap Skenario Kombinasi Pembebanan Kapal

Table 7.6.a Load Scenarios and Load Combination						
Load Scenario	Harbour Loads	Operational Loads	Impact loads	Sloshing Loads	Accidental flooding loads	Cyclic loads
Design Load Combination	S	S + D	Impact	Sloshing	A	Fatigue
Hull Girder	$M_{v-total}$	$M_{sur-perm-harb} + M_{acc}$	-	$M_{sur-perm-harb}$	-	M_{acc}
	$M_{ir-total}$	M_{li}	-	-	-	M_{acc-li}
	Q	$Q_{sur-perm-harb} + Q_{acc}$	-	-	-	-
	Weather Deck Hull envelope	P_{deck} $P_{hys} + P_{ex-dyn}$	- P_{in} and P_{sin}	- -	- -	- $P_{ex-simp}$
Local Loads	P_{ex}	- P_{hys}	- P_{in} and P_{sin}	- -	$P_{sur-flood}$	$P_{in-simp}$
	Ballast tanks (BWE with sequential filling method)	the greater of a) $P_{in-test}$ b) $P_{in-air} + P_{drop}$	-	P_{sli}	$P_{sur-flood}$	$P_{in-simp}$
	Ballast tanks (BWE with flow-through method)	the greater of a) $P_{in-test}$ b) $P_{in-air} + P_{drop}$	-	P_{sli}	$P_{sur-flood}$	$P_{in-simp}$
	Cargo tanks including cargo tanks designed for filling with water ballast	$P_{in-test}$	-	P_{sli}	-	$P_{in-simp}$
	Other tanks with liquid filling Watertight boundaries	the greater of a) $P_{in-test}$ b) P_{in-air}	- -	P_{sli} -	$P_{sur-flood}$ $P_{sur-flood}$	- -
P_{dlc}	Internal decks for dry spaces Decks for heavy units	P_{stat} F_{stat}	$P_{stat} + P_{dyn}$ -	- -	- -	- -

Berdasarkan Common Structural Rule (CSR) 2015 section 4 hal. 40, sumbu (x,y,z) berada pada titik after peak (AP) di sepanjang sumbu x, perpotongan bidang simetris (centerline) pada sumbu y, dan baseline disepanjang sumbu z.



Sedangkan Bulb Plate pada model dapat dikonversi menjadi pelat L dan Flat bar yang dapat dilihat pada tabel sebagai berikut:

no.	Bulb Bar	modulus of section (cm ³)	L Profile	F Profile	Used
1	220 x 11	300	200 x 100 x 10	220 x 18	L
2	200 x 10	220	150 x 90 x 12	220 x 14	L
3	240 x 11	370	250 x 90 x 10	240 x 19	L
4	280 x 11	530	250 x 90 x 14	300 x 18	L
5	220 x 10	280	150 x 100 x 14	220 x 17	L
6	320 x 12	780	-	320 x 23	F
7	180 x 10	175	120 x 80 x 14	160 x 18	L

Perhitungan spring stiffness

- Vertical Springs

No.	Object	Unit	Nodal Point				
			node 1	node 2	node 3	node 4	node 5
1	A _{s-net50-1}	mm ²	73293	20350	51000	20350	73293
2	A _{s-net50-2}	mm ²	34300	24148	68750	24148	34300
3	A _{s-net50-3}	mm ²	47940	36400	22500	36400	47940
4	A _{s-net50-4}	mm ²	29575	47940	-	47940	29575
5	A _{s-net50-5}	mm ²	-	29575	-	29575	-
6	A _{s-net50}	mm ²	185108	158413	142250	158413	185108
7	n	-	1	1	1	1	1
8	c	N/mm	1310650	1121637	1007195	1121637	1310649,7

- Horizontal Springs

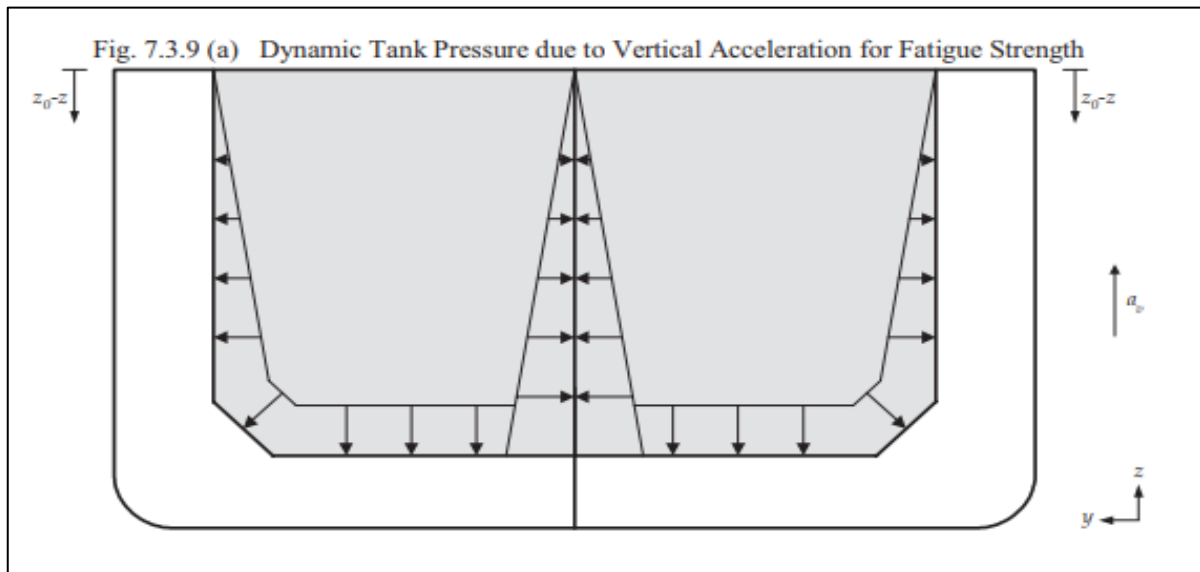
No.	Object	Unit	Nodal Point			Keterangan
			node 1	node 2	node 3	
1	$A_{s-net50-1}$	mm^2	4,16E+05	15000	36500	-
2	$A_{s-net50-2}$	mm^2	-	24148	1,26E+05	-
3	$A_{s-net50-3}$	mm^2	-	2,59E+05	33000	-
4	$A_{s-net50-4}$	mm^2	-	24148	1,26E+05	-
5	$A_{s-net50-5}$	mm^2	-	15000	36500	-
6	$A_{s-net50}$	mm^2	4,16E+05	337406	358000	-
7	n	-	1	1	1	-
8	c	N/mm	2941931	2388990	2534805	-

Dimana:

E 200000 N/mm² l_{tk} 21750 mm

I. Penentuan Koordinat Titik Berat Beban

a. Koordinat vertikal (sumbu z)



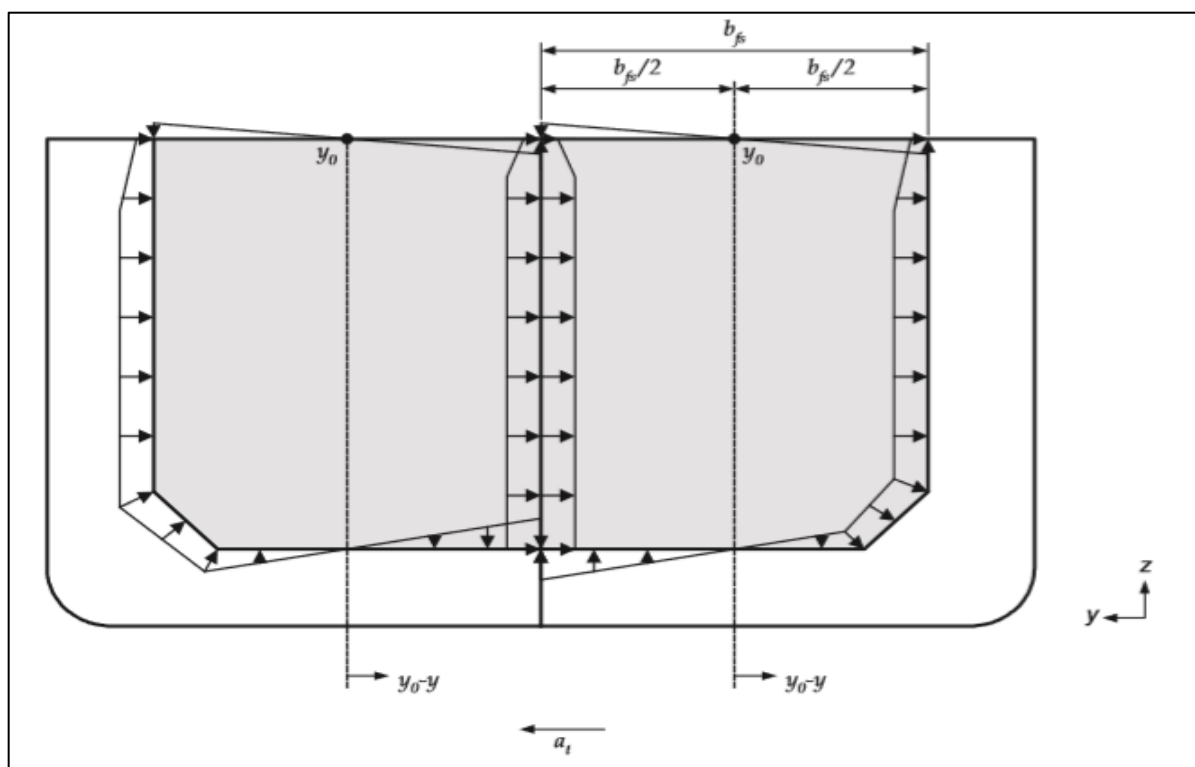
Menurut Common Structural Rule (CSR) 2015 section 7 hal. 152, maka didapatkan perhitungan sebagai berikut:

Gading	s (m)	z (m)	z_0 (m)	$z_0 - z$ (m)
LV -1	0,46	12,5	12,5	0
LV 0	0,46	12,04	12,5	0,46
LV 1	0,65	11,58	12,5	0,92
LV 2	0,65	10,93	12,5	1,57
LV 3	0,65	10,28	12,5	2,22
LV 4	0,65	9,63	12,5	2,87
LV 5	0,65	8,98	12,5	3,52
LV 6	0,65	8,33	12,5	4,17
LV 7	0,65	7,68	12,5	4,82
LV 8	0,65	7,03	12,5	5,47
LV 9	0,65	6,38	12,5	6,12
LV 10	0,65	5,73	12,5	6,77
LV 11	0,65	5,08	12,5	7,42
LV 12	0,65	4,43	12,5	8,07
LV 13	0,65	3,78	12,5	8,72
LV 14	0,65	3,13	12,5	9,37
LV 15	0,63	2,48	12,5	10,02
LV 16	0,615	1,85	12,5	10,65
LV 17	0,62	1,235	12,5	11,265
LV 18	0,615	0,615	12,5	11,885
LV 19	0	0	12,5	12,5
Total	12,5			

Sedangkan untuk posisi penegar bagian bilga, maka didapatkan koordinat sebagai berikut:

Gading	s (m)	z (m)	z_0 (m)	z_0-z (m)
LV 14 b	0,32	3,13	12,5	9,37
LV 1.1	0,32	2,81	12,5	9,69
LV 1.2	0,32	2,49	12,5	10,01
LV 1.3	0,32	2,17	12,5	10,33
LV 16 b	0,574	1,85	12,5	10,65
LV 1.4	0,487	0,926	12,5	11,574
LV 1.5	0,325	0,439	12,5	12,061
LV 1.6	0,114	0,114	12,5	12,386
LH 21 b	0	0	12,5	12,5

b. Koordinat horisontal (sumbu y)



Menurut Common Structural Rule (CSR) 2015 section 7 hal. 153, maka didapatkan perhitungan sebagai berikut:

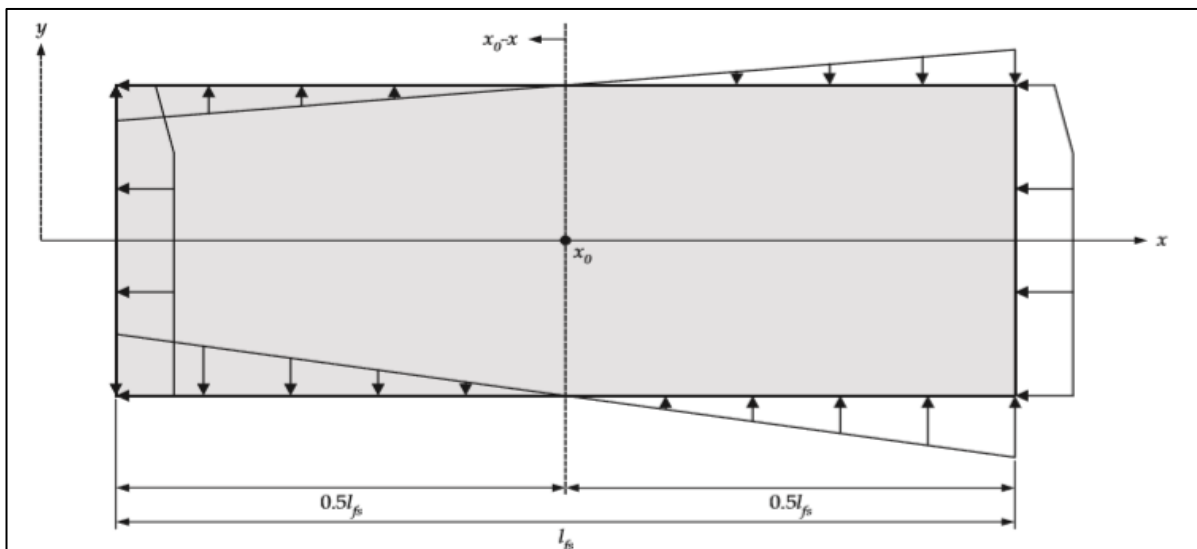
Gading	s (m)	y (m)	y_0 (m)	y_0-y (m)
LH 0	0	0	-6,175	-6,175
LH 1	-0,6	-0,6	-6,175	-5,575
LH 2	-0,6	-1,2	-6,175	-4,975
LH 3	-0,6	-1,8	-6,175	-4,375
LH 4	-0,6	-2,4	-6,175	-3,775
LH 5	-0,6	-3	-6,175	-3,175
LH 6	-0,6	-3,6	-6,175	-2,575
LH 7	-0,6	-4,2	-6,175	-1,975
LH 8	-0,6	-4,8	-6,175	-1,375
LH 9	-0,6	-5,4	-6,175	-0,775

LH 10	-0,6	-6	-6,175	-0,175
LH 11	-0,6	-6,6	-6,175	0,425
LH 12	-0,6	-7,2	-6,175	1,025
LH 13	-0,6	-7,8	-6,175	1,625
LH 14	-0,6	-8,4	-6,175	2,225
LH 15	-0,6	-9	-6,175	2,825
LH 16	-0,6	-9,6	-6,175	3,425
LH 17	-0,6	-10,2	-6,175	4,025
LH 18	-0,6	-10,8	-6,175	4,625
LV 1,1	-0,3875	-11,1875	-6,175	5,0125
LV 1,2	-0,3875	-11,575	-6,175	5,4
LV 1,3	-0,3875	-11,9625	-6,175	5,7875
LC 19	-0,3875	-12,35	-6,175	6,175
Total	-12,35			

Sedangkan untuk posisi penegar bagian bilga, maka didapatkan koordinat sebagai berikut:

Gading	s (m)	y (m)	y_0 (m)	$y_0 - y$ (m)	-y (m)
LH 18	0	10,8	-6,175	-16,975	-10,8
LH 19	0,55	11,35	-6,175	-17,525	-11,35
LH 20	0,55	11,9	-6,175	-18,075	-11,9
LH 21	0,45	12,35	-6,175	-18,525	-12,35
LH 1,6	0,57403	12,924	-6,175	-19,099	-12,924
LH 1,5	0,48664	13,4107	-6,175	-19,586	-13,4107
LH 1,4	0,32516	13,7358	-6,175	-19,911	-13,7358
LV 16	0,11418	13,85	-6,175	-20,025	-13,85
Total	3,05				

c. Koordinat longitudinal (sumbu x)



Menurut Common Structural Rule (CSR) 2015 section 7 hal. 153, maka didapatkan perhitungan sebagai berikut:

a 0,75 m l_{tk} 21,75 m

- koordinat sumbu x pada tanki 1

no.	Gading	FR	s (m)	x (m)	x_0 (m)	$x_0 - x$ (m)
1	LL 0	71	2	53,25	64,125	10,875
2	LL 1	74	3	55,5	64,125	8,625
3	LL 2	76	2	57	64,125	7,125
4	LL 3	80	4	60	64,125	4,125
5	LL 4	84	4	63	64,125	1,125
6	LL 5	88	4	66	64,125	-1,875
7	LL 6	92	4	69	64,125	-4,875
8	LL 7	96	4	72	64,125	-7,875
9	LL 8	98	2	73,5	64,125	-9,375

- koordinat sumbu x pada tanki 2

no.	Gading	FR	s (m)	x (m)	x_0 (m)	$x_0 - x$ (m)
1	LL 9	100	2	75	85,875	10,875
2	LL 10	103	3	77,25	85,875	8,625
3	LL 11	105	2	78,75	85,875	7,125
4	LL 12	109	4	81,75	85,875	4,125
5	LL 13	113	4	84,75	85,875	1,125
6	LL 14	117	4	87,75	85,875	-1,875
7	LL 15	121	4	90,75	85,875	-4,875
8	LL 16	125	4	93,75	85,875	-7,875
9	LL 17	127	2	95,25	85,875	-9,375

- koordinat sumbu x pada tanki 3

no.	Gading	FR	s (m)	x (m)	x_0 (m)	$x_0 - x$ (m)
1	LL 18	129	2	96,75	107,625	10,875
2	LL 19	132	3	99	107,625	8,625
3	LL 20	134	2	100,5	107,625	7,125
4	LL 21	138	4	103,5	107,625	4,125
5	LL 22	142	4	106,5	107,625	1,125
6	LL 23	146	4	109,5	107,625	-1,875
7	LL 24	150	4	112,5	107,625	-4,875
8	LL 25	154	4	115,5	107,625	-7,875
9	LL 26	156	2	117	107,625	-9,375
10	LL 27	158	2	118,5	107,625	-10,875

II. Perhitungan Beban Gelombang Dinamis

1

Menurut Common Structural Rule (CSR) 2015 section 7 hal. 145, perhitungan beban gelombang dinamis dilaksanakan melalui persamaan sebagai berikut:

$$P_1 = 2f_{prob}f_{nl-P1} \left[\left(P_{11} + \frac{135B_{local}}{4(B+75)} - 1.2(T_{LC} - z) \right) f_1 + \frac{135B_{local}}{4(B+75)} f_2 \right] \quad (kN/m^2)$$

$$P_2 = 26f_{prob}f_{nl-P2} \left[\left(\frac{B_{local}}{8} \theta + f_T C_b \frac{0.25B_{local} + 0.8C_{wv}}{14} \left(0.7 + \frac{2z}{T_{LC}} \right) \right) f_1 + \left(\frac{B_{local}}{8} \theta + f_T C_b \frac{0.25B_{local}}{14} \left(0.7 + \frac{2z}{T_{LC}} \right) \right) f_2 \right] \quad (kN/m^2)$$

Sehingga didapatkan perhitungan konstanta dan beban sebagai berikut

	f_{prob}	$f_{nl-P1/P2}$	f_v	f_{lng}	f_s	f_T	B_{local}	C_{wv}	P_{11}	$1/4 B$
P_1	0,5	1	1	0,7	0,837	0,9	27,7	8,926	29,55	-6,925
P_2	0,5	1	1	-	-	-	-	-	-	-

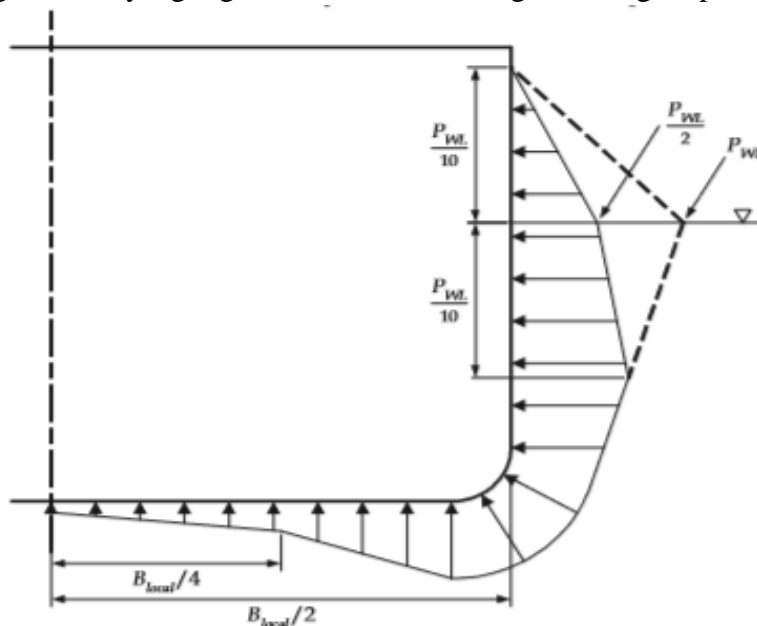
- Perhitungan Beban Gelombang Dinamis Horisontal

Gading	s (m)	y (m)	z (m)	f_2	f_1	P_2 kN/m ²	P_1 kN/m ²
LH 0	0	0	0	-0,25	0,625	0,982	31,32
LH 1	-0,6	-0,6	0	-0,228	0,631	1,045	31,46
LH 2	-0,6	-1,2	0	-0,207	0,638	1,108	31,61
LH 3	-0,6	-1,8	0	-0,185	0,644	1,171	31,75
LH 4	-0,6	-2,4	0	-0,163	0,651	1,234	31,9
LH 5	-0,6	-3	0	-0,142	0,657	1,297	32,04
LH 6	-0,6	-3,6	0	-0,12	0,664	1,359	32,19
LH 7	-0,6	-4,2	0	-0,098	0,67	1,422	32,33
LH 8	-0,6	-4,8	0	-0,077	0,677	1,485	32,48
LH 9	-0,6	-5,4	0	-0,055	0,683	1,548	32,62
LH 10	-0,6	-6	0	-0,033	0,69	1,611	32,76
LH 11	-0,6	-6,6	0	-0,012	0,696	1,674	32,91
LH 12	-0,6	-7,2	0	0,04	0,712	1,823	33,25
LH 13	-0,6	-7,8	0	0,126	0,738	2,075	33,83
LH 14	-0,6	-8,4	0	0,213	0,764	2,326	34,41
LH 15	-0,6	-9	0	0,3	0,79	2,578	34,99
LH 16	-0,6	-9,6	0	0,386	0,816	2,829	35,56
LH 17	-0,6	-10,2	0	0,473	0,842	3,081	36,14
LH 18	-0,6	-10,8	0	0,56	0,868	3,332	36,72
LH 19	-0,55	-11,35	0	0,639	0,892	3,563	37,25
LH 20	-0,55	-11,9	0	0,718	0,916	3,793	37,78
LH 21	-0,45	-12,35	0	0,783	0,935	3,982	38,21

- Perhitungan Beban Gelombang Dinamis Vertikal

Gading	s (m)	y (m)	z (m)	f_2	f_1	P_2 kN/m ²	P_1 kN/m ²
LV -1	0,46	-13,85	12,5	1	1	8,794	54,66
LV 0	0,46	-13,85	12,04	1	1	8,64	54,11
LV 1	0,65	-13,85	11,58	1	1	8,486	53,56
LV 2	0,65	-13,85	10,93	1	1	8,269	52,78
LV 3	0,65	-13,85	10,28	1	1	8,051	52
LV 4	0,65	-13,85	9,63	1	1	7,834	51,22
LV 5	0,65	-13,85	8,98	1	1	7,616	50,44
LV 6	0,65	-13,85	8,33	1	1	7,398	49,66
LV 7	0,65	-13,85	7,68	1	1	7,181	48,88
LV 8	0,65	-13,85	7,03	1	1	6,963	48,1
LV 9	0,65	-13,85	6,38	1	1	6,746	47,32
LV 10	0,65	-13,85	5,73	1	1	6,528	46,54
LV 11	0,65	-13,85	5,08	1	1	6,311	45,76
LV 12	0,65	-13,85	4,43	1	1	6,093	44,98
LV 13	0,65	-13,85	3,78	1	1	5,876	44,2
LV 14	0,65	-13,85	3,13	1	1	5,658	43,42
LV 15	0,63	-13,85	2,48	1	1	5,441	42,64
LV 16	0,615	-13,85	1,85	1	1	5,23	41,88
LH 1,4	0,325	-13,74	0,926	0,984	0,995	4,87	40,66
LH 1,5	0,487	-13,41	0,439	0,937	0,981	4,569	39,75
LH 1,6	0,574	-12,92	0,114	0,866	0,96	4,258	38,9
LH 21	0,45	-12,35	0	0,783	0,935	3,982	38,21
h_{WL}	-	-13,85	7,5	1	1	7,121	48,66
$h_{WL/10}$	-	-13,85	2,634	1	1	5,492	42,82
$h_{WL.0}$	-	-13,85	12,37	-	-	0	0

Karena analisa yang diterapkan adalah perhitungan beban cyclic, maka jenis beban gelombang dinamis yang digunakan adalah beban gelombang amplitudo (P_{ex-amp}).



Sehingga didapatkan beban gelombang amplitudo ($P_{\text{ex-amp}}$) sebagai berikut:

- Perhitungan Beban Gelombang Dinamis Vertikal

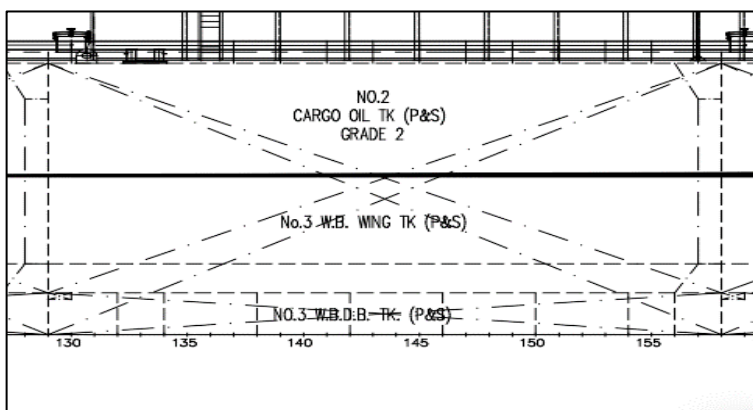
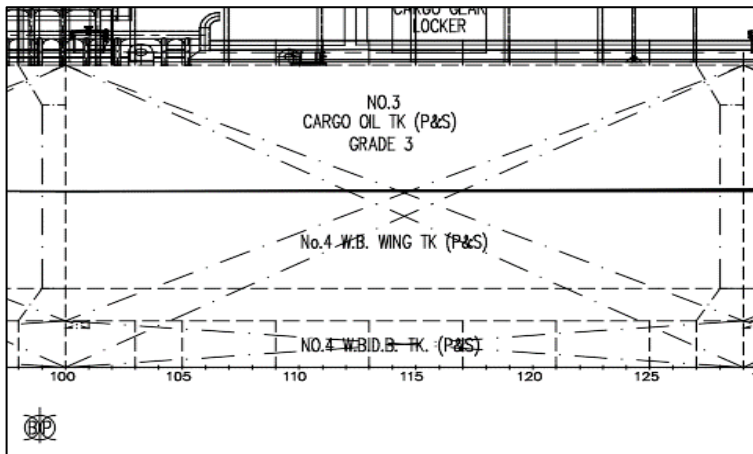
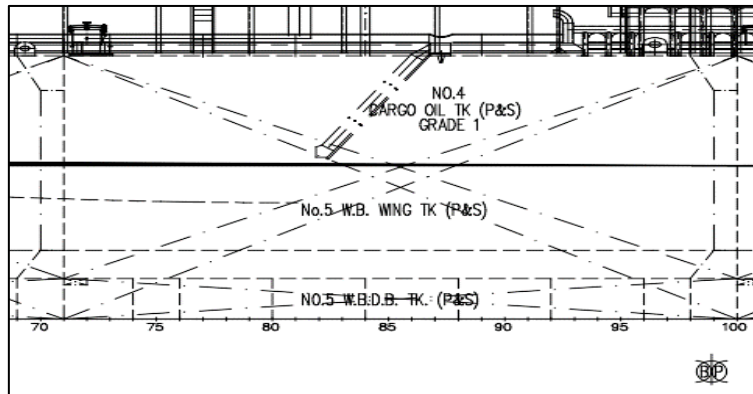
0	Gading	s (m)	y (m)	z (m)	f_2	f_1	P_{1-0} kN/m ²	y (m)	P_0 kN/m ²	P_1 kN/m ²	P_1 Pascal
	h_{WL0}	-	-13,85	12,37	-	-	0	0	-	0	0
1	LV 0	0,46	-13,85	12,04	1	1	54,11	0,326	-	1,63	1630
2	LV 1	0,65	-13,85	11,58	1	1	53,56	0,786	-	3,93	3930
3	LV 2	0,65	-13,85	10,93	1	1	52,78	1,436	-	7,18	7180
4	LV 3	0,65	-13,85	10,28	1	1	52	2,086	-	10,43	10430
5	LV 4	0,65	-13,85	9,63	1	1	51,22	2,736	-	13,68	13680
6	LV 5	0,65	-13,85	8,98	1	1	50,44	3,386	-	16,93	16930
7	LV 6	0,65	-13,85	8,33	1	1	49,66	4,036	-	20,18	20180
8	LV 7	0,65	-13,85	7,68	1	1	48,88	4,686	-	23,43	23430
	h_{WL}	-	-13,85	7,5	1	1	24,33	4,866	-	24,33	24330
9	LV 8	0,65	-13,85	7,03	1	1	48,1	-0,47	1,786	26,12	26116
10	LV 9	0,65	-13,85	6,38	1	1	47,32	-1,12	4,256	28,59	28586
11	LV 10	0,65	-13,85	5,73	1	1	46,54	-1,77	6,726	31,06	31056
12	LV 11	0,65	-13,85	5,08	1	1	45,76	-2,42	9,196	33,53	33526
13	LV 12	0,65	-13,85	4,43	1	1	44,98	-3,07	11,67	36	35996
14	LV 13	0,65	-13,85	3,78	1	1	44,2	-3,72	14,14	38,47	38466
15	LV 14	0,65	-13,85	3,13	1	1	43,42	-4,37	16,61	40,94	40936
	$h_{WL/10}$	-	-13,85	2,634	1	1	42,82	-4,866	18,49	42,82	42821
16	LV 15	0,63	-13,85	2,48	1	1	42,64	-	-	42,64	42636
17	LV 16	0,615	-13,85	1,85	1	1	41,88	-	-	41,88	41880
18	LH 1,4	0,325	-13,74	0,926	0,984	0,995	40,66	-	-	40,66	40656
19	LH 1,5	0,487	-13,41	0,439	0,937	0,981	39,75	-	-	39,75	39754
20	LH 1,6	0,574	-12,92	0,114	0,866	0,96	38,9	-	-	38,9	38899
21	LH 21	0,45	-12,35	0	0,783	0,935	38,21	-	-	38,21	38215

- Perhitungan Beban Gelombang Dinamis Horisontal

Gading	s (m)	y (m)	z (m)	f_2	f_1	P_1 kN/m ²	P_1 Pascal
LH 0	0	0	0	-0,25	0,625	31,32	31319
LH 1	-0,6	-0,6	0	-0,228	0,631	31,46	31464
LH 2	-0,6	-1,2	0	-0,207	0,638	31,61	31608
LH 3	-0,6	-1,8	0	-0,185	0,644	31,75	31753
LH 4	-0,6	-2,4	0	-0,163	0,651	31,9	31897
LH 5	-0,6	-3	0	-0,142	0,657	32,04	32042
LH 6	-0,6	-3,6	0	-0,12	0,664	32,19	32186
LH 7	-0,6	-4,2	0	-0,098	0,67	32,33	32331
LH 8	-0,6	-4,8	0	-0,077	0,677	32,48	32475
LH 9	-0,6	-5,4	0	-0,055	0,683	32,62	32620
LH 10	-0,6	-6	0	-0,033	0,69	32,76	32764
LH 11	-0,6	-6,6	0	-0,012	0,696	32,91	32909
LH 12	-0,6	-7,2	0	0,04	0,712	33,25	33252

III. Penentuan Perhitungan Beban Tanki

Adapun Gambar Model Tanki dapat dilihat pada gambar sebagai berikut:



a. Ukuran Utama Kapal

Dimensi	size	Unit	Dimensi	size	Unit
L	150,72	m	v	13	m/s ²
B	27,7	m	Cb	0,837	
H	12	m	DWT	17500	t
Tsc	7,5	m	p	1,025	t/m ³
Td	7	m		0,9	t/m ³

b. Perhitungan olah gerak kapal

Menurut Common Structural Rule (CSR) 2015 section 7 hal. 139, maka didapatkan perhitungan besaran olah gerak kapal sebagai berikut:

f_t	0,9	T_{LC}	6,75	m
f_v	1,287	GM	3,324	m
p	1,025	r _{roll-gvr}	9,695	

Dimensi Roll Kapal			Dimensi Pitch Kapal		
U_{roll}	12,231	s	U_{pitch}	13,503	s
θ	0,552	rads	φ	0,221	rads

c. Perhitungan konstanta dan konstanta percepatan kapal

Menurut Common Structural Rule (CSR) 2015 section 7 hal. 140, maka didapatkan perhitungan besaran olah gerak kapal sebagai berikut:

	Vertikal	Tranvers	Long.	Strength	Na.
f_v	1,20453	-	1,7	1	0
f_{prob}	0,45	0,5	0,5	1	0

a_{heave}	5,53376 m/s ²	a_0	0,46831 m/s ²	T_{LC}	6,75	m
a_{sway}	1,37824 m/s ²	C_{b-LC}	0,896786	GM	3,324	m
a_{surge}	0,91882 m/s ³	r _{roll-gvr}	9,695			

$a_{pitch-z}$ (m/s ²)					
Tangki I		Tangki II		Tangki III	
LL 0	0,53187	LL 9	0,261884	LL 18	1,05564
LL 1	0,44976	LL 10	0,343996	LL 19	1,13775
LL 2	0,39502	LL 11	0,398738	LL 20	1,19249
LL 3	0,28553	LL 12	0,508221	LL 21	1,30197
LL 4	0,17605	LL 13	0,617704	LL 22	1,41146
LL 5	0,06657	LL 14	0,727188	LL 23	1,52094
LL 6	0,04292	LL 15	0,836671	LL 24	1,63042
LL 7	0,1524	LL 16	0,946154	LL 25	1,73991
LL 8	0,20714	LL 17	1,000896	LL 26	1,79465
-	-	-	-	LL 27	1,84939

Gading	s (m)	y (m)	y_0-y (m)	a_{roll-z} (m/s ²)	Ket		
LH 18	0,6	10,8	4,625	1,886845	LV 16		common
LV 1,1	0,3875	11,1875	5,0125	1,954544	LV 1,1		single
LV 1,2	0,3875	11,575	5,4	2,022244	LV 1,2		single
LV 1,3	0,3875	11,9625	5,7875	2,089943	LV 1,3		single
LC 19	0,3875	12,35	6,175	2,157642	LV -1 to LV 14		common
Total				0,174708			

d Perhitungan Beban tranverse Kapal

Perhitungan Beban tranverse pada Kapal dapat ditentukan melalui persamaan:

$$P_{in-t} = \rho a_t |y_0 - y| \quad (kN/m^2)$$

Menurut Common Structural Rule (CSR) 2015 section 7 hal. 149, maka didapatkan perhitungan besaran olah gerak kapal sebagai berikut:

- Perhitungan beban tranverse pada inner hull longitudinal bulkhead (S) dan hopper plate (S)

no.	Gading	z (m)	z ₀ -z (m)	R _{roll-1} (m)	R _{roll-2} (m)	a _{roll-y} (m/s ²)	a _t (m/s ²)	y ₀ -y (m)	P _{in-t} (kN/m ²)
1	LV -1	12,5	0	6,125	6,5	0,946334	0,86353	-6,175	-4,79909
2	LV 0	12,04	0,46	5,665	6,04	0,879363	0,84378	-6,175	-4,6893
3	LV 1	11,58	0,92	5,205	5,58	0,812392	0,82491	-6,175	-4,58443
4	LV 2	10,93	1,57	4,555	4,93	0,717758	0,79988	-6,175	-4,44532
5	LV 3	10,28	2,22	3,905	4,28	0,623125	0,77692	-6,175	-4,31776
6	LV 4	9,63	2,87	3,255	3,63	0,528491	0,75624	-6,175	-4,2028
7	LV 5	8,98	3,52	2,605	2,98	0,433858	0,73801	-6,175	-4,1015
8	LV 6	8,33	4,17	1,955	2,33	0,339224	0,72243	-6,175	-4,01489
9	LV 7	7,68	4,82	1,305	1,68	0,244591	0,70966	-6,175	-3,94395
10	LV 8	7,03	5,47	0,655	1,03	0,149958	0,69987	-6,175	-3,88952
11	LV 9	6,38	6,12	0,005	0,38	0,055324	0,69317	-6,175	-3,85232
12	LV 10	5,73	6,77	-0,645	-0,27	-0,03931	0,68967	-6,175	-3,83284
13	LV 11	5,08	7,42	-1,295	-0,92	-0,13394	0,6894	-6,175	-3,83134
14	LV 12	4,43	8,07	-1,945	-1,57	-0,22858	0,69237	-6,175	-3,84787
15	LV 13	3,78	8,72	-2,595	-2,22	-0,32321	0,69855	-6,175	-3,88217
16	LV 14	3,13	9,37	-3,245	-2,87	-0,41784	0,70783	-6,175	-3,93379
17	LV 1.1	2,81	9,69	-3,565	-3,19	-0,46443	0,71352	-5,0125	-3,21885
18	LV 1.2	2,49	10,01	-3,885	-3,51	-0,51102	0,71991	-5,4	-3,49875
19	LV 1.3	2,17	10,33	-4,205	-3,83	-0,55761	0,72699	-5,7875	-3,7867
20	LV 16	1,85	10,65	-4,525	-4,15	-0,6042	0,73474	-4,625	-3,05836

- Perhitungan beban tranverse pada inner bottom plate (S)

no.	Gading	y ₀ -y (m)	ρ (t/m ³)	P _{in-t} (kN/m ²)	no.	Gading	y ₀ -y (m)	ρ (t/m ³)	P _{in-t} (kN/m ²)
1	LH 0	-6,175	0,9	-4,08332	13	LH 12	1,025	0,9	0,677798
2	LH 1	-5,575	0,9	-3,68656	14	LH 13	1,625	0,9	1,074559
3	LH 2	-4,975	0,9	-3,2898	15	LH 14	2,225	0,9	1,471319
4	LH 3	-4,375	0,9	-2,89304	16	LH 15	2,825	0,9	1,868079
5	LH 4	-3,775	0,9	-2,49628	17	LH 16	3,425	0,9	2,264839
6	LH 5	-3,175	0,9	-2,09952	18	LH 17	4,025	0,9	2,661599
7	LH 6	-2,575	0,9	-1,70276	19	LH 18	4,625	0,9	3,058359
8	LH 7	-1,975	0,9	-1,306	20	LV 1,1	5,0125	0,9	3,3146
9	LH 8	-1,375	0,9	-0,90924	21	LV 1,2	5,4	0,9	3,570841
10	LH 9	-0,775	0,9	-0,51248	22	LV 1,3	5,7875	0,9	3,827082
11	LH 10	-0,175	0,9	-0,11572	23	LC 19	6,175	0,9	4,083323
12	LH 11	0,425	0,9	0,28104					

e Perhitungan Beban Longitudinal Kapal

Perhitungan Beban Longitudinal pada Kapal dapat ditentukan melalui persamaan:

$$P_{in-lng} = \rho a_{lng} |x_0 - x| \quad (kN/m^2)$$

Menurut Common Structural Rule (CSR) 2015 section 7 hal. 149, maka didapatkan perhitungan besaran olah gerak kapal sebagai berikut:

Gading	x (m)	$x_0 - x$ (m)	Gading	x (m)	$ x_0 - x $ (m)	Gading	x (m)	$ x_0 - x $ (m)
LL 0	53,25	10,875	LL 9	75	10,875	LL 18	96,75	10,875
LL 1	55,5	8,625	LL 10	77,25	8,625	LL 19	99	8,625
LL 2	57	7,125	LL 11	78,75	7,125	LL 20	100,5	7,125
LL 3	60	4,125	LL 12	81,75	4,125	LL 21	103,5	4,125
LL 4	63	1,125	LL 13	84,75	1,125	LL 22	106,5	1,125
LL 5	66	-1,875	LL 14	87,75	-1,875	LL 23	109,5	-1,875
LL 6	69	-4,875	LL 15	90,75	-4,875	LL 24	112,5	-4,875
LL 7	72	-7,875	LL 16	93,75	-7,875	LL 25	115,5	-7,875
LL 8	73,5	-9,375	LL 17	95,25	-9,375	LL 26	117	-9,375

Berdasarkan peletakan titik beban muatan tanki diatas, maka didapatkan beban longitudinal merata sebagai berikut:

Gading	a _{pitch-x} (m/s ²)	a _{lng} (m/s ²)	P _{in-lng} (kN/m ²)									
			LL 0	LL 1	LL 2	LL 3	LL 4	LL 5	LL 6	LL 7	LL 8	
			LL 9	LL 10	LL 11	LL 12	LL 13	LL 14	LL 15	LL 16	LL 17	
			LL 18	LL 19	LL 20	LL 21	LL 22	LL 23	LL 24	LL 25	LL 26	
LV -1	0,528	0,334	3,273	2,596	2,145	1,242	0,339	-0,564	-1,467	-2,370	-2,822	
LV 0	0,491	0,333	3,258	2,584	2,134	1,236	0,337	-0,562	-1,460	-2,359	-2,808	
LV 1	0,453	0,331	3,243	2,572	2,125	1,230	0,335	-0,559	-1,454	-2,348	-2,795	
LV 2	0,400	0,329	3,224	2,557	2,112	1,223	0,333	-0,556	-1,445	-2,334	-2,779	
LV 3	0,348	0,328	3,207	2,543	2,101	1,216	0,332	-0,553	-1,437	-2,322	-2,764	
LV 4	0,295	0,326	3,192	2,531	2,091	1,211	0,330	-0,550	-1,431	-2,311	-2,751	
LV 5	0,242	0,325	3,179	2,521	2,083	1,206	0,329	-0,548	-1,425	-2,302	-2,740	
LV 6	0,189	0,324	3,168	2,513	2,076	1,202	0,328	-0,546	-1,420	-2,294	-2,731	
LV 7	0,136	0,323	3,160	2,506	2,070	1,199	0,327	-0,545	-1,416	-2,288	-2,724	
LV 8	0,084	0,322	3,153	2,501	2,066	1,196	0,326	-0,544	-1,414	-2,284	-2,718	
LV 9	0,031	0,322	3,149	2,498	2,063	1,195	0,326	-0,543	-1,412	-2,281	-2,715	
LV 10	-0,022	0,322	3,148	2,496	2,062	1,194	0,326	-0,543	-1,411	-2,279	-2,713	
LV 11	-0,075	0,322	3,148	2,497	2,063	1,194	0,326	-0,543	-1,411	-2,280	-2,714	
LV 12	-0,128	0,322	3,151	2,499	2,064	1,195	0,326	-0,543	-1,412	-2,282	-2,716	
LV 13	-0,180	0,322	3,156	2,503	2,068	1,197	0,326	-0,544	-1,415	-2,285	-2,720	
LV 14	-0,233	0,323	3,163	2,508	2,072	1,200	0,327	-0,545	-1,418	-2,290	-2,727	
LV 1.1	-0,259	0,324	3,167	2,512	2,075	1,201	0,328	-0,546	-1,420	-2,293	-2,730	
LV 1.2	-0,285	0,324	3,172	2,516	2,078	1,203	0,328	-0,547	-1,422	-2,297	-2,734	
LV 1.3	-0,311	0,325	3,177	2,520	2,082	1,205	0,329	-0,548	-1,424	-2,301	-2,739	
LV 16	-0,337	0,325	3,183	2,525	2,086	1,207	0,329	-0,549	-1,427	-2,305	-2,744	

f Perhitungan Beban Vertikal Kapal

Sebelum dilaksanakan perhitungan beban vertikal pada kapal, maka harus diketahui terlebih dahulu penyebaran percepatan vertikal kapal yang dapat dilihat pada tabel sebagai berikut:

- Perhitungan akselerasi vertikal untuk tangki I

Gading	z_0-z (m)	a_{roll-z} (m/s^2)	a_v (m/s^2)								
			LL 0	LL 1	LL 2	LL 3	LL 4	LL 5	LL 6	LL 7	LL 8
LV -1	0	2,158	2,683	2,68	2,6787	2,676	2,674	2,673	2,6729	2,6737	2,674
LV 0	0,46	2,158	2,683	2,68	2,6787	2,676	2,674	2,673	2,6729	2,6737	2,674
LV 1	0,92	2,158	2,683	2,68	2,6787	2,676	2,674	2,673	2,6729	2,6737	2,674
LV 2	1,57	2,158	2,683	2,68	2,6787	2,676	2,674	2,673	2,6729	2,6737	2,674
LV 3	2,22	2,158	2,683	2,68	2,6787	2,676	2,674	2,673	2,6729	2,6737	2,674
LV 4	2,87	2,158	2,683	2,68	2,6787	2,676	2,674	2,673	2,6729	2,6737	2,674
LV 5	3,52	2,158	2,683	2,68	2,6787	2,676	2,674	2,673	2,6729	2,6737	2,674
LV 6	4,17	2,158	2,683	2,68	2,6787	2,676	2,674	2,673	2,6729	2,6737	2,674
LV 7	4,82	2,158	2,683	2,68	2,6787	2,676	2,674	2,673	2,6729	2,6737	2,674
LV 8	5,47	2,158	2,683	2,68	2,6787	2,676	2,674	2,673	2,6729	2,6737	2,674
LV 9	6,12	2,158	2,683	2,68	2,6787	2,676	2,674	2,673	2,6729	2,6737	2,674
LV 10	6,77	2,158	2,683	2,68	2,6787	2,676	2,674	2,673	2,6729	2,6737	2,674
LV 11	7,42	2,158	2,683	2,68	2,6787	2,676	2,674	2,673	2,6729	2,6737	2,674
LV 12	8,07	2,158	2,683	2,68	2,6787	2,676	2,674	2,673	2,6729	2,6737	2,674
LV 13	8,72	2,158	2,683	2,68	2,6787	2,676	2,674	2,673	2,6729	2,6737	2,674
LV 14	9,37	2,158	2,683	2,68	2,6787	2,676	2,674	2,673	2,6729	2,6737	2,674
LV 1.1	9,69	1,955	2,652	2,649	2,6469	2,644	2,6421	2,6411	2,641	2,6418	2,643
LV 1.2	10,01	2,022	2,662	2,659	2,6572	2,654	2,6524	2,6514	2,6513	2,6521	2,653
LV 1.3	10,33	2,09	2,673	2,67	2,6678	2,665	2,663	2,662	2,6619	2,6628	2,663
LV 16	10,65	1,887	2,642	2,639	2,637	2,634	2,6322	2,6311	2,631	2,6319	2,633

- Perhitungan akselerasi vertikal untuk tangki II

Gading	z_0-z (m)	a_{roll-z} (m/s^2)	a_v (m/s^2)								
			LL 9	LL 10	LL 11	LL 12	LL 13	LL 14	LL 15	LL 16	LL 17
LV -1	0	2,158	2,675	2,677	2,6788	2,683	2,6872	2,6927	2,6992	2,7065	2,71
LV 0	0,46	2,158	2,675	2,677	2,6788	2,683	2,6872	2,6927	2,6992	2,7065	2,71
LV 1	0,92	2,158	2,675	2,677	2,6788	2,683	2,6872	2,6927	2,6992	2,7065	2,71
LV 2	1,57	2,158	2,675	2,677	2,6788	2,683	2,6872	2,6927	2,6992	2,7065	2,71
LV 3	2,22	2,158	2,675	2,677	2,6788	2,683	2,6872	2,6927	2,6992	2,7065	2,71
LV 4	2,87	2,158	2,675	2,677	2,6788	2,683	2,6872	2,6927	2,6992	2,7065	2,71
LV 5	3,52	2,158	2,675	2,677	2,6788	2,683	2,6872	2,6927	2,6992	2,7065	2,71
LV 6	4,17	2,158	2,675	2,677	2,6788	2,683	2,6872	2,6927	2,6992	2,7065	2,71
LV 7	4,82	2,158	2,675	2,677	2,6788	2,683	2,6872	2,6927	2,6992	2,7065	2,71
LV 8	5,47	2,158	2,675	2,677	2,6788	2,683	2,6872	2,6927	2,6992	2,7065	2,71
LV 9	6,12	2,158	2,675	2,677	2,6788	2,683	2,6872	2,6927	2,6992	2,7065	2,71
LV 10	6,77	2,158	2,675	2,677	2,6788	2,683	2,6872	2,6927	2,6992	2,7065	2,71
LV 11	7,42	2,158	2,675	2,677	2,6788	2,683	2,6872	2,6927	2,6992	2,7065	2,71
LV 12	8,07	2,158	2,675	2,677	2,6788	2,683	2,6872	2,6927	2,6992	2,7065	2,71
LV 13	8,72	2,158	2,675	2,677	2,6788	2,683	2,6872	2,6927	2,6992	2,7065	2,71

LV 14	9,37	2,158	2,675	2,677	2,6788	2,683	2,6872	2,6927	2,6992	2,7065	2,71
LV 1.1	9,69	1,955	2,644	2,645	2,647	2,651	2,6555	2,6612	2,6677	2,6751	2,679
LV 1.2	10,01	2,022	2,654	2,656	2,6573	2,661	2,6658	2,6714	2,6779	2,6852	2,689
LV 1.3	10,33	2,09	2,664	2,666	2,6679	2,672	2,6763	2,6819	2,6884	2,6957	2,7
LV 16	10,65	1,887	2,634	2,636	2,6371	2,641	2,6456	2,6512	2,6578	2,6652	2,669

- Perhitungan akselerasi vertikal untuk tangki III

Gading	a_{roll-z} (m/s ²)	a_v (m/s ²)									
		LL 18	LL 19	LL 20	LL 21	LL 22	LL 23	LL 24	LL 25	LL 26	LL 27
LV -1	2,158	2,715	2,721	2,726	2,7362	2,747	2,759	2,7717	2,7851	2,7921	2,799
LV 0	2,158	2,715	2,721	2,726	2,7362	2,747	2,759	2,7717	2,7851	2,7921	2,799
LV 1	2,158	2,715	2,721	2,726	2,7362	2,747	2,759	2,7717	2,7851	2,7921	2,799
LV 2	2,158	2,715	2,721	2,726	2,7362	2,747	2,759	2,7717	2,7851	2,7921	2,799
LV 3	2,158	2,715	2,721	2,726	2,7362	2,747	2,759	2,7717	2,7851	2,7921	2,799
LV 4	2,158	2,715	2,721	2,726	2,7362	2,747	2,759	2,7717	2,7851	2,7921	2,799
LV 5	2,158	2,715	2,721	2,726	2,7362	2,747	2,759	2,7717	2,7851	2,7921	2,799
LV 6	2,158	2,715	2,721	2,726	2,7362	2,747	2,759	2,7717	2,7851	2,7921	2,799
LV 7	2,158	2,715	2,721	2,726	2,7362	2,747	2,759	2,7717	2,7851	2,7921	2,799
LV 8	2,158	2,715	2,721	2,726	2,7362	2,747	2,759	2,7717	2,7851	2,7921	2,799
LV 9	2,158	2,715	2,721	2,726	2,7362	2,747	2,759	2,7717	2,7851	2,7921	2,799
LV 10	2,158	2,715	2,721	2,726	2,7362	2,747	2,759	2,7717	2,7851	2,7921	2,799
LV 11	2,158	2,715	2,721	2,726	2,7362	2,747	2,759	2,7717	2,7851	2,7921	2,799
LV 12	2,158	2,715	2,721	2,726	2,7362	2,747	2,759	2,7717	2,7851	2,7921	2,799
LV 13	2,158	2,715	2,721	2,726	2,7362	2,747	2,759	2,7717	2,7851	2,7921	2,799
LV 14	2,158	2,715	2,721	2,726	2,7362	2,747	2,759	2,7717	2,7851	2,7921	2,799
LV 1.1	1,955	2,683	2,69	2,695	2,7052	2,716	2,7282	2,741	2,7546	2,7617	2,769
LV 1.2	2,022	2,693	2,7	2,705	2,7152	2,726	2,7382	2,7509	2,7645	2,7715	2,779
LV 1.3	2,09	2,704	2,711	2,715	2,7256	2,737	2,7484	2,7611	2,7746	2,7817	2,789
LV 16	1,887	2,674	2,68	2,685	2,6954	2,707	2,7185	2,7314	2,745	2,7521	2,759

Setelah menentukan penyebaran percepatan vertikal pada tangki kapal, maka dilaksanakan perhitungan beban vertikal tangki dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_{in-v} = \rho a_v |z_0 - z| \quad (kN/m^2)$$

Menurut Persamaan Common Structural Rule (CSR) 2015 section 7 hal. 149 diatas, maka didapatkan perhitungan besaran olah gerak kapal sebagai berikut:

- Perhitungan Beban Vertikal untuk Tangki I

Gading	$z_0 - z$ (m)	ρ (t/m ³)	P_{in-v} (kN/m ²)								
			LL 0	LL 1	LL 2	LL 3	LL 4	LL 5	LL 6	LL 7	LL 8
LV -1	0	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LV 0	0,46	0,9	1,111	1,11	1,109	1,108	1,107	1,1066	1,1066	1,1069	1,107
LV 1	0,92	0,9	2,222	2,219	2,218	2,216	2,214	2,2132	2,2131	2,2138	2,214
LV 2	1,57	0,9	3,792	3,787	3,785	3,781	3,7783	3,7769	3,7767	3,7779	3,779
LV 3	2,22	0,9	5,362	5,356	5,352	5,346	5,3426	5,3406	5,3404	5,342	5,343
LV 4	2,87	0,9	6,931	6,924	6,9191	6,912	6,9068	6,9042	6,904	6,9061	6,908
LV 5	3,52	0,9	8,501	8,492	8,4861	8,477	8,4711	8,4679	8,4676	8,4702	8,473

LV 6	4,17	0,9	10,07	10,06	10,053	10,04	10,035	10,032	10,031	10,034	10,04
LV 7	4,82	0,9	11,64	11,63	11,62	11,61	11,6	11,595	11,595	11,598	11,6
LV 8	5,47	0,9	13,21	13,2	13,187	13,17	13,164	13,159	13,158	13,162	13,17
LV 9	6,12	0,9	14,78	14,76	14,754	14,74	14,728	14,723	14,722	14,727	14,73
LV 10	6,77	0,9	16,35	16,33	16,321	16,3	16,292	16,286	16,286	16,291	16,3
LV 11	7,42	0,9	17,92	17,9	17,888	17,87	17,857	17,85	17,849	17,855	17,86
LV 12	8,07	0,9	19,49	19,47	19,455	19,43	19,421	19,414	19,413	19,419	19,42
LV 13	8,72	0,9	21,06	21,04	21,022	21	20,985	20,977	20,977	20,983	20,99
LV 14	9,37	0,9	22,63	22,6	22,589	22,57	22,549	22,541	22,54	22,547	22,55
LV 1.1	9,69	0,9	23,13	23,1	23,084	23,06	23,042	23,033	23,032	23,04	23,05
LV 1.2	10,01	0,9	23,98	23,95	23,939	23,91	23,896	23,887	23,886	23,893	23,9
LV 1.3	10,33	0,9	24,85	24,82	24,803	24,78	24,758	24,749	24,748	24,756	24,76
LV 16	10,65	0,9	25,32	25,29	25,275	25,25	25,229	25,219	25,218	25,226	25,23

- Perhitungan Beban Vertikal untuk Tanki II

Gading	Z ₀ -Z (m)	ρ (t/m ³)	P _{in-v} (kN/m ²)								
			LL 9	LL 10	LL 11	LL 12	LL 13	LL 14	LL 15	LL 16	LL 17
LV -1	0	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LV 0	0,46	0,9	1,108	1,108	1,109	1,111	1,1125	1,1148	1,1175	1,1205	1,122
LV 1	0,92	0,9	2,215	2,217	2,218	2,221	2,225	2,2296	2,2349	2,241	2,244
LV 2	1,57	0,9	3,78	3,783	3,7851	3,79	3,797	3,8048	3,8139	3,8243	3,83
LV 3	2,22	0,9	5,345	5,349	5,3522	5,36	5,369	5,3801	5,3929	5,4076	5,416
LV 4	2,87	0,9	6,911	6,915	6,9193	6,929	6,941	6,9554	6,972	6,9908	7,001
LV 5	3,52	0,9	8,476	8,482	8,4864	8,498	8,513	8,5306	8,551	8,5741	8,587
LV 6	4,17	0,9	10,04	10,05	10,054	10,07	10,085	10,106	10,13	10,157	10,17
LV 7	4,82	0,9	11,61	11,61	11,621	11,64	11,657	11,681	11,709	11,741	11,76
LV 8	5,47	0,9	13,17	13,18	13,188	13,21	13,229	13,256	13,288	13,324	13,34
LV 9	6,12	0,9	14,74	14,75	14,755	14,78	14,801	14,832	14,867	14,907	14,93
LV 10	6,77	0,9	16,3	16,31	16,322	16,34	16,373	16,407	16,446	16,491	16,51
LV 11	7,42	0,9	17,87	17,88	17,889	17,91	17,945	17,982	18,025	18,074	18,1
LV 12	8,07	0,9	19,43	19,44	19,456	19,48	19,517	19,557	19,604	19,657	19,69
LV 13	8,72	0,9	21	21,01	21,023	21,05	21,089	21,133	21,183	21,24	21,27
LV 14	9,37	0,9	22,56	22,58	22,59	22,62	22,661	22,708	22,762	22,824	22,86
LV 1.1	9,69	0,9	23,05	23,07	23,085	23,12	23,159	23,208	23,265	23,329	23,36
LV 1.2	10,01	0,9	23,91	23,93	23,94	23,97	24,016	24,066	24,125	24,191	24,23
LV 1.3	10,33	0,9	24,77	24,79	24,804	24,84	24,882	24,934	24,994	25,062	25,1
LV 16	10,65	0,9	25,24	25,26	25,276	25,31	25,358	25,412	25,475	25,546	25,58

- Perhitungan Beban Vertikal untuk Tanki III

Gading	Z ₀ -Z (m)	P _{in-v} (kN/m ²)									
		LL 18	LL 19	LL 20	LL 21	LL 22	LL 23	LL 24	LL 25	LL 26	LL 27
LV -1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LV 0	0,46	1,124	1,127	1,129	1,1328	1,137	1,1422	1,1475	1,153	1,1559	1,159
LV 1	0,92	2,248	2,253	2,257	2,2656	2,275	2,2845	2,2949	2,3061	2,3119	2,318
LV 2	1,57	3,836	3,845	3,852	3,8663	3,882	3,8985	3,9163	3,9353	3,9453	3,955
LV 3	2,22	5,424	5,437	5,447	5,467	5,489	5,5125	5,5378	5,5646	5,5787	5,593
LV 4	2,87	7,012	7,029	7,042	7,0677	7,096	7,1266	7,1592	7,1939	7,2121	7,231
LV 5	3,52	8,6	8,621	8,636	8,6684	8,703	8,7406	8,7806	8,8232	8,8455	8,868

LV 6	4,17	10,19	10,21	10,23	10,269	10,31	10,355	10,402	10,452	10,479	10,51
LV 7	4,82	11,78	11,81	11,83	11,87	11,92	11,969	12,023	12,082	12,112	12,14
LV 8	5,47	13,36	13,4	13,42	13,471	13,52	13,583	13,645	13,711	13,746	13,78
LV 9	6,12	14,95	14,99	15,02	15,071	15,13	15,197	15,266	15,34	15,379	15,42
LV 10	6,77	16,54	16,58	16,61	16,672	16,74	16,811	16,888	16,97	17,012	17,06
LV 11	7,42	18,13	18,17	18,21	18,273	18,35	18,425	18,509	18,599	18,646	18,69
LV 12	8,07	19,72	19,77	19,8	19,873	19,95	20,039	20,131	20,228	20,279	20,33
LV 13	8,72	21,3	21,36	21,39	21,474	21,56	21,653	21,752	21,857	21,913	21,97
LV 14	9,37	22,89	22,95	22,99	23,075	23,17	23,267	23,373	23,487	23,546	23,61
LV 1.1	9,69	23,4	23,46	23,5	23,592	23,69	23,793	23,904	24,023	24,085	24,15
LV 1.2	10,01	24,27	24,33	24,37	24,461	24,56	24,668	24,783	24,905	24,969	25,03
LV 1.3	10,33	25,14	25,2	25,25	25,34	25,44	25,552	25,67	25,796	25,861	25,93
LV 16	10,65	25,63	25,69	25,74	25,836	25,94	26,057	26,18	26,311	26,379	26,45

g Perhitungan Beban Amplitudo Kapal

Perhitungan Beban amplitudo pada Kapal dapat ditentukan melalui persamaan:

$$P_{in-amp} = f_v P_{in-v} + f_{ull-t} f_t P_{in-t} + f_{ull-lng} f_{lng} P_{in-lng} \quad (kN/m^2)$$

Menurut Common Structural Rule (CSR) 2015 section 7 hal. 149, maka didapatkan perhitungan besaran olah gerak kapal sebagai berikut:

b_{fs} 12,35 m l_{fs} 21,75 m h_{roll} 1,7032 h_{pitch} 1,2

no.	Gadin g	z_0-z (m)	f_{full-t}	$f_{full-lng}$	f_v	f_t	f_{lng}
1	LV -1	0	0,5	0,5	0,9	0,9	0,4
2	LV 0	0,46	0,635	0,692	0,9	0,9	0,4
3	LV 1	0,92	0,7701	0,883	0,9	0,9	0,4
4	LV 2	1,57	0,9609	1,154	0,9	0,9	0,4
5	LV 3	2,22	1,1517	1,425	0,9	0,9	0,4
6	LV 4	2,87	1,3425	1,696	0,9	0,9	0,4
7	LV 5	3,52	1,5333	1,967	0,9	0,9	0,4
8	LV 6	4,17	1,7242	2,237	0,9	0,9	0,4
9	LV 7	4,82	1,915	2,508	0,9	0,9	0,4
10	LV 8	5,47	2,1058	2,779	0,9	0,9	0,4
11	LV 9	6,12	2,2966	3,05	0,9	0,9	0,4
12	LV 10	6,77	2,4874	3,321	0,9	0,9	0,4
13	LV 11	7,42	2,6782	3,592	0,9	0,9	0,4
14	LV 12	8,07	2,8691	3,862	0,9	0,9	0,4
15	LV 13	8,72	3,0599	4,133	0,9	0,9	0,4
16	LV 14	9,37	3,2507	4,404	0,9	0,9	0,4
17	LV 1.1	9,69	3,3446	4,537	0,9	0,9	0,4
18	LV 1.2	10,01	3,4386	4,671	0,9	0,9	0,4
19	LV 1.3	10,33	3,5325	4,804	0,9	0,9	0,4
20	LV 16	10,65	3,6264	4,937	0,9	0,9	0,4

Setelah penentuan nilai konstanta, maka dapat ditentukan nilai beban amplitudo yang akan digunakan sebagai input model FEM sebagai berikut:

- Perhitungan beban amplitudo untuk Tanki I

no.	Gadin g	Z ₀ -Z (m)	P _{in-amp} (kN/m ²)								
			LL 0	LL 1	LL 2	LL 3	LL 4	LL 5	LL 6	LL 7	LL 8
1	LV -1	0	-1,5	-1,64	-1,731	-1,911	-2,092	-2,272	-2,453	-2,6337	-2,724
2	LV 0	0,46	-0,78	-0,967	-1,092	-1,341	-1,591	-1,84	-2,088	-2,3365	-2,461
3	LV 1	0,92	-0,03	-0,271	-0,43	-0,749	-1,066	-1,383	-1,699	-2,0146	-2,172
4	LV 2	1,57	1,056	0,745	0,5372	0,123	-0,29	-0,702	-1,112	-1,5219	-1,726
5	LV 3	2,22	2,178	1,794	1,5388	1,03	0,5219	0,0159	-0,489	-0,9913	-1,242
6	LV 4	2,87	3,325	2,87	2,5674	1,964	1,362	0,7624	0,165	-0,4304	-0,727
7	LV 5	3,52	4,492	3,966	3,6157	2,918	2,2226	1,5299	0,8398	0,1522	-0,191
8	LV 6	4,17	5,669	5,072	4,6755	3,884	3,0951	2,3095	1,5269	0,7475	0,359
9	LV 7	4,82	6,85	6,182	5,7379	4,852	3,9703	3,0918	2,2169	1,3455	0,911
10	LV 8	5,47	8,024	7,285	6,7938	5,814	4,8387	3,8672	2,8997	1,9362	1,456
11	LV 9	6,12	9,182	8,372	7,8336	6,76	5,6903	4,6254	3,5649	2,509	1,983
12	LV 10	6,77	10,32	9,434	8,848	7,679	6,5152	5,3563	4,2023	3,0534	2,481
13	LV 11	7,42	11,42	10,46	9,8275	8,563	7,3038	6,0501	4,8018	3,559	2,94
14	LV 12	8,07	12,47	11,45	10,763	9,402	8,0467	6,6972	5,3537	4,0161	3,35
15	LV 13	8,72	13,48	12,38	11,647	10,19	8,7354	7,289	5,849	4,4155	3,701
16	LV 14	9,37	14,43	13,25	12,472	10,91	9,3622	7,8175	6,2797	4,7488	3,986
17	LV 1.1	9,69	16,87	15,66	14,852	13,24	11,643	10,05	8,4631	6,8837	6,097
18	LV 1.2	10,01	16,68	15,43	14,6	12,94	11,292	9,6486	8,013	6,3848	5,573
19	LV 1.3	10,33	16,43	15,14	14,284	12,58	10,875	9,1824	7,4973	5,8197	4,984
20	LV 16	10,65	19,09	17,77	16,885	15,13	13,375	11,632	9,8965	8,1693	7,309

- Perhitungan beban amplitudo untuk Tanki II

no.	Gadin g	Z ₀ -Z (m)	P _{in-amp} (kN/m ²)								
			LL 9	LL 10	LL 11	LL 12	LL 13	LL 14	LL 15	LL 16	LL 17
1	LV -1	0	-1,5	-1,64	-1,731	-1,911	-2,092	-2,272	-2,453	-2,6337	-2,724
2	LV 0	0,46	-0,78	-0,968	-1,091	-1,339	-1,586	-1,832	-2,078	-2,3243	-2,447
3	LV 1	0,92	-0,04	-0,274	-0,43	-0,744	-1,056	-1,368	-1,68	-1,9902	-2,145
4	LV 2	1,57	1,046	0,741	0,5374	0,132	-0,273	-0,677	-1,079	-1,4802	-1,68
5	LV 3	2,22	2,163	1,788	1,539	1,042	0,5457	0,0514	-0,441	-0,9323	-1,177
6	LV 4	2,87	3,306	2,863	2,5677	1,979	1,3928	0,8084	0,2261	-0,3541	-0,643
7	LV 5	3,52	4,469	3,957	3,6161	2,937	2,2603	1,5863	0,9148	0,2458	-0,088
8	LV 6	4,17	5,642	5,062	4,6758	3,906	3,1398	2,3763	1,6158	0,8583	0,481
9	LV 7	4,82	6,818	6,17	5,7383	4,878	4,022	3,1691	2,3197	1,4737	1,052
10	LV 8	5,47	7,988	7,271	6,7943	5,844	4,8974	3,9548	3,0163	2,0816	1,616
11	LV 9	6,12	9,142	8,357	7,8342	6,793	5,7559	4,7235	3,6954	2,6717	2,161
12	LV 10	6,77	10,27	9,417	8,8486	7,716	6,5878	5,4648	4,3467	3,2333	2,678
13	LV 11	7,42	11,37	10,44	9,8282	8,603	7,3833	6,169	4,96	3,7563	3,156
14	LV 12	8,07	12,42	11,43	10,764	9,446	8,1332	6,8266	5,5257	4,2307	3,585
15	LV 13	8,72	13,42	12,36	11,648	10,24	8,8289	7,4288	6,0349	4,6473	3,956
16	LV 14	9,37	14,37	13,23	12,473	10,96	9,4627	7,9677	6,4794	4,9979	4,26
17	LV 1.1	9,69	16,81	15,63	14,853	13,3	11,748	10,207	8,6721	7,1444	6,383
18	LV 1.2	10,01	16,62	15,41	14,601	13	11,4	9,8104	8,2281	6,653	5,868
19	LV 1.3	10,33	16,36	15,11	14,285	12,63	10,987	9,3487	7,7184	6,0954	5,287
20	LV 16	10,65	19,02	17,74	16,886	15,18	13,491	11,805	10,127	8,4568	7,625

- Perhitungan beban amplitudo untuk Tanki III

no.	Gadin g	P _{in-amp} (kN/m ²)									
		LL 18	LL 19	LL 20	LL 21	LL 22	LL 23	LL 24	LL 25	LL 26	LL 27
1	LV -1	-1,5	-1,64	-1,731	-1,911	-2,092	-2,272	-2,453	-2,634	-2,724	-1,505
2	LV 0	-0,77	-0,95	-1,074	-1,319	-1,563	-1,807	-2,051	-2,295	-2,4167	-0,736
3	LV 1	-0,01	-0,24	-0,395	-0,704	-1,012	-1,319	-1,626	-1,932	-2,0844	0,055
4	LV 2	1,096	0,797	0,598	0,1999	-0,197	-0,592	-0,987	-1,38	-1,5765	1,204
5	LV 3	2,234	1,868	1,624	1,1381	0,654	0,1706	-0,311	-0,791	-1,0304	2,386
6	LV 4	3,398	2,965	2,678	2,104	1,532	0,9625	0,3946	-0,171	-0,4536	3,594
7	LV 5	4,581	4,082	3,751	3,09	2,431	1,7753	1,1215	0,47	0,1451	4,822
8	LV 6	5,775	5,211	4,836	4,0877	3,343	2,6002	1,8607	1,1239	0,7565	6,061
9	LV 7	6,972	6,342	5,923	5,088	4,256	3,4279	2,6027	1,7806	1,3708	7,302
10	LV 8	8,162	7,466	7,004	6,0817	5,163	4,2485	3,3374	2,43	1,9776	8,537
11	LV 9	9,337	8,575	8,069	7,059	6,053	5,052	4,0547	3,0614	2,5663	9,757
12	LV 10	10,49	9,659	9,108	8,0102	6,917	5,8283	4,7441	3,6645	3,1263	10,95
13	LV 11	11,6	10,71	10,11	8,9258	7,744	6,5674	5,3956	4,2288	3,6472	12,11
14	LV 12	12,68	11,71	11,07	9,7967	8,526	7,2598	5,9995	4,7446	4,119	13,23
15	LV 13	13,7	12,67	11,98	10,615	9,253	7,8969	6,5469	5,2026	4,5326	14,3
16	LV 14	14,67	13,56	12,83	11,372	9,918	8,4707	7,0296	5,5946	4,8794	15,31
17	LV 1.1	17,12	15,98	15,23	13,724	12,23	10,733	9,2476	7,7685	7,0314	17,79
18	LV 1.2	16,94	15,77	14,99	13,436	11,89	10,352	8,8204	7,2954	6,5353	17,63
19	LV 1.3	16,69	15,48	14,68	13,083	11,49	9,9055	8,3272	6,7558	5,9726	17,4
20	LV 16	19,37	18,13	17,3	15,655	14,02	12,386	10,762	9,1452	8,3396	20,11

Jika diubah dalam bentuk satuan Pascal, maka didapatkan nilai sebagai berikut:

- Perhitungan beban amplitudo untuk Tanki I

no.	Gadin g	z ₀ -z (m)	P _{in-amp} (Pascal)								
			LL 0	LL 1	LL 2	LL 3	LL 4	LL 5	LL 6	LL 7	LL 8
1	LV -1	0	-1505	-1640	-1731	-1911	-2092	-2272	-2453	-2633,7	-2724
2	LV 0	0,46	-779	-966,6	-1092	-1341	-1591	-1840	-2088	-2336,5	-2461
3	LV 1	0,92	-31,8	-271,1	-430,5	-748,7	-1066	-1383	-1699	-2014,6	-2172
4	LV 2	1,57	1056	744,7	537,21	123,1	-289,9	-701,7	-1112	-1521,9	-1726
5	LV 3	2,22	2178	1794	1538,8	1030	521,86	15,85	-488,5	-991,28	-1242
6	LV 4	2,87	3325	2870	2567,4	1964	1362	762,41	164,95	-430,4	-727,3
7	LV 5	3,52	4492	3966	3615,7	2918	2222,6	1529,9	839,76	152,24	-190,6
8	LV 6	4,17	5669	5072	4675,5	3884	3095,1	2309,5	1526,9	747,47	358,9
9	LV 7	4,82	6850	6182	5737,9	4852	3970,3	3091,8	2216,9	1345,5	911,2
10	LV 8	5,47	8024	7285	6793,8	5814	4838,7	3867,2	2899,7	1936,2	1456
11	LV 9	6,12	9182	8372	7833,6	6760	5690,3	4625,4	3564,9	2509	1983
12	LV 10	6,77	10316	9434	8848	7679	6515,2	5356,3	4202,3	3053,4	2481
13	LV 11	7,42	11416	10462	9827,5	8563	7303,8	6050,1	4801,8	3559	2940
14	LV 12	8,07	12473	11446	10763	9402	8046,7	6697,2	5353,7	4016,1	3350
15	LV 13	8,72	13480	12379	11647	10188	8735,4	7289	5849	4415,5	3701
16	LV 14	9,37	14430	13254	12472	10914	9362,2	7817,5	6279,7	4748,8	3986
17	LV 1.1	9,69	16873	15659	14852	13244	11643	10050	8463,1	6883,7	6097
18	LV 1.2	10,01	16683	15432	14600	12942	11292	9648,6	8013	6384,8	5573
19	LV 1.3	10,33	16429	15141	14284	12576	10875	9182,4	7497,3	5819,7	4984
20	LV 16	10,65	19095	17767	16885	15126	13375	11632	9896,5	8169,3	7309

- Perhitungan beban amplitudo untuk Tanki II

no.	Gadin g	z ₀ -z (m)	P _{in-amp} (Pascal)								
			LL 9	LL 10	LL 11	LL 12	LL 13	LL 14	LL 15	LL 16	LL 17
1	LV -1	0	-1505	-1640	-1731	-1911	-2092	-2272	-2453	-2633,7	-2724
2	LV 0	0,46	-782	-967,8	-1091	-1339	-1586	-1832	-2078	-2324,3	-2447
3	LV 1	0,92	-37,9	-273,5	-430,4	-743,7	-1056	-1368	-1680	-1990,2	-2145
4	LV 2	1,57	1046	740,7	537,35	131,6	-273,1	-676,6	-1079	-1480,2	-1680
5	LV 3	2,22	2163	1788	1539	1042	545,67	51,436	-441,2	-932,26	-1177
6	LV 4	2,87	3306	2863	2567,7	1979	1392,8	808,42	226,13	-354,1	-643,5
7	LV 5	3,52	4469	3957	3616,1	2937	2260,3	1586,3	914,8	245,81	-87,74
8	LV 6	4,17	5642	5062	4675,8	3906	3139,8	2376,3	1615,8	858,33	480,7
9	LV 7	4,82	6818	6170	5738,3	4878	4022	3169,1	2319,7	1473,7	1052
10	LV 8	5,47	7988	7271	6794,3	5844	4897,4	3954,8	3016,3	2081,6	1616
11	LV 9	6,12	9142	8357	7834,2	6793	5755,9	4723,5	3695,4	2671,7	2161
12	LV 10	6,77	10272	9417	8848,6	7716	6587,8	5464,8	4346,7	3233,3	2678
13	LV 11	7,42	11367	10443	9828,2	8603	7383,3	6169	4960	3756,3	3156
14	LV 12	8,07	12420	11425	10764	9446	8133,2	6826,6	5525,7	4230,7	3585
15	LV 13	8,72	13423	12357	11648	10235	8828,9	7428,8	6034,9	4647,3	3956
16	LV 14	9,37	14368	13230	12473	10964	9462,7	7967,7	6479,4	4997,9	4260
17	LV 1.1	9,69	16808	15634	14853	13297	11748	10207	8672,1	7144,4	6383
18	LV 1.2	10,01	16617	15406	14601	12997	11400	9810,4	8228,1	6653	5868
19	LV 1.3	10,33	16361	15114	14285	12632	10987	9348,7	7718,4	6095,4	5287
20	LV 16	10,65	19024	17740	16886	15184	13491	11805	10127	8456,8	7625

- Perhitungan beban amplitudo untuk Tanki III

no.	Gadin g	P _{in-amp} (Pascal)									
		LL 18	LL 19	LL 20	LL 21	LL 22	LL 23	LL 24	LL 25	LL 26	LL 27
1	LV -1	-1505	-1640	-1731	-1911	-2092	-2272	-2453	-2634	-2724	-1505
2	LV 0	-767	-951	-1074	-1319	-1563	-1807	-2051	-2295	-2416,7	-735,8
3	LV 1	-8,58	-241	-395,1	-703,7	-1012	-1319	-1626	-1932	-2084,4	54,53
4	LV 2	1096	796,8	597,5	199,86	-196,7	-592,3	-986,8	-1380	-1576,5	1204
5	LV 3	2234	1868	1624	1138,1	653,6	170,62	-310,9	-790,9	-1030,4	2386
6	LV 4	3398	2965	2678	2104	1532	962,5	394,64	-171,3	-453,62	3594
7	LV 5	4581	4082	3751	3090	2431	1775,3	1121,5	469,97	145,09	4822
8	LV 6	5775	5211	4836	4087,7	3343	2600,2	1860,7	1123,9	756,51	6061
9	LV 7	6972	6342	5923	5088	4256	3427,9	2602,7	1780,6	1370,8	7302
10	LV 8	8162	7466	7004	6081,7	5163	4248,5	3337,4	2430	1977,6	8537
11	LV 9	9337	8575	8069	7059	6053	5052	4054,7	3061,4	2566,3	9757
12	LV 10	10487	9659	9108	8010,2	6917	5828,3	4744,1	3664,5	3126,3	10951
13	LV 11	11603	10708	10113	8925,8	7744	6567,4	5395,6	4228,8	3647,2	12112
14	LV 12	12677	11714	11073	9796,7	8526	7259,8	5999,5	4744,6	4119	13231
15	LV 13	13701	12669	11982	10615	9253	7896,9	6546,9	5202,6	4532,6	14299
16	LV 14	14667	13565	12832	11372	9918	8470,7	7029,6	5594,6	4879,4	15309
17	LV 1.1	17120	15984	15229	13724	12225	10733	9247,6	7768,5	7031,4	17793
18	LV 1.2	16938	15766	14988	13436	11890	10352	8820,4	7295,4	6535,3	17630
19	LV 1.3	16691	15485	14682	13083	11491	9905,5	8327,2	6755,8	5972,6	17403
20	LV 16	19368	18126	17300	15655	14017	12386	10762	9145,2	8339,6	20109

LAMPIRAN B
PERHITUNGAN PENJALARAN RETAK

Perhitungan Penjalaran Retak Material dan Umur Struktur

a. Penentuan nilai stress intensity factor mode I (K_I)

Karena jenis retak menembus ke arah ketebalan pelat (through surface crack), maka kedalaman awal retak dihitung mulai dari 0,5 mm (standar ABS) hingga ketebalan pelat sebesar 14 mm

$$\Delta K_I = \beta \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$

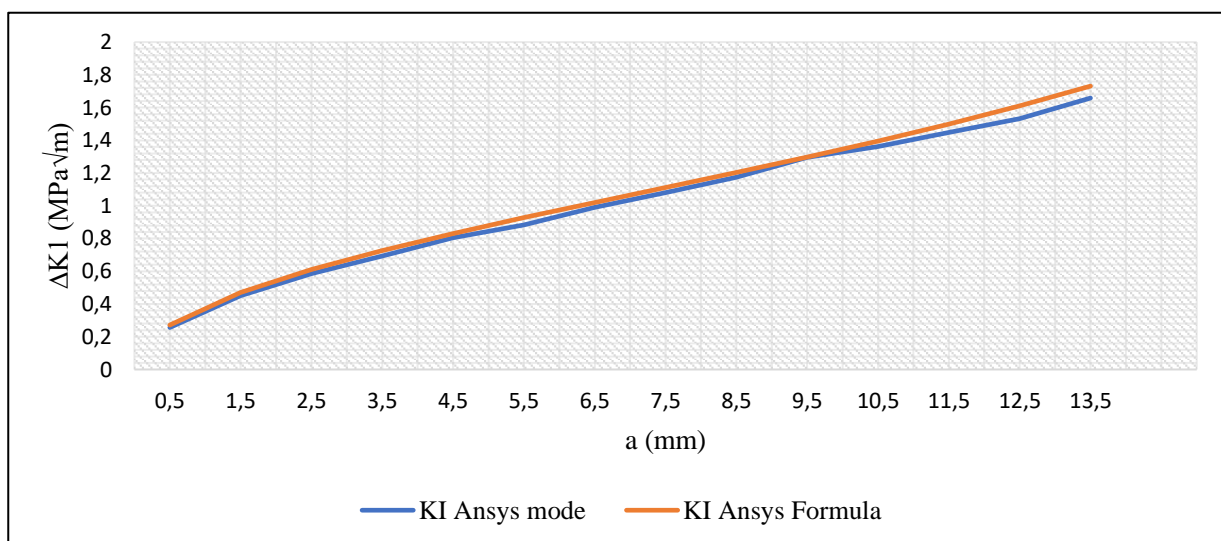
$$\Delta \sigma$$

$$6,8502 \text{ Mpa}$$

$$\beta = (1 - 0.025 \alpha^2 + 0.06 \alpha^4) \sqrt{\sec \frac{\alpha \pi}{2}}$$

Tabel Perhitungan SIF

no.	a (mm)	c (mm)	β	ΔK_I (MPa $\sqrt{\text{mm}}$)		ΔK_I (MPa $\sqrt{\text{m}}$)	
				Ansys	Formula	Ansys	Formula
1	0,5	1	1,000237	7,411056381	8,587486	0,25659135	0,27156014
2	1,5	3	1,002137	13,04450804	14,90222	0,45163709	0,47124952
3	2,5	5	1,005968	16,91413838	19,31222	0,58561443	0,61070609
4	3,5	7	1,011791	20,61112923	22,9828	0,69300339	0,72678002
5	4,5	9	1,019702	23,95610813	26,26382	0,80547087	0,83053485
6	5,5	11	1,029836	27,05158298	29,32429	0,88249775	0,92731553
7	6,5	13	1,042369	30,38355063	32,26683	0,99119578	1,02036666
8	7,5	15	1,05753	34,15677629	35,16427	1,08013211	1,11199185
9	8,5	17	1,075612	37,16381862	38,0753	1,17522313	1,20404663
10	9,5	19	1,096984	39,71238191	41,05258	1,29552816	1,29819641
11	10,5	21	1,122117	41,72698505	44,14798	1,36125011	1,39608184
12	11,5	23	1,151609	45,81382955	47,41679	1,4487605	1,49945055
13	12,5	25	1,186234	48,45490834	50,92178	1,53227874	1,61028815
14	13,5	27	1,227003	52,4369349	54,73821	1,65820148	1,73097408



Melalui tabel konstanta hirt and fisher, nilai C untuk Baja adalah 2×10^{-10} m sebesar 3 untuk kategori steel. Dengan demikian maka dapat dilakukan perhitungan penjalaran retak dan cycle melalui rumus sebagai berikut:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad \text{-----} \quad \Delta N = \frac{\Delta a}{\left[\frac{da}{dN} \right]} \quad \text{-----} \quad N = \Delta N + N_0$$

no.	a (mm)	af (mm)	Δa (mm)	C	m	da/dN (m/cycle)	ΔN (cycle)
1	0,5	1,5	1	2,00E+10	3	8,1409E-09	122837128
2	1,5	2,5	1	2,00E+10	3	4,4393E-08	22526145,7
3	2,5	3,5	1	2,00E+10	3	9,6779E-08	10332855,7
4	3,5	4,5	1	2,00E+10	3	1,7512E-07	5710375,21
5	4,5	5,5	1	2,00E+10	3	2,7497E-07	3636815,01
6	5,5	6,5	1	2,00E+10	3	3,9592E-07	2525759,25
7	6,5	7,5	1	2,00E+10	3	5,6098E-07	1782602,17
8	7,5	8,5	1	2,00E+10	3	7,97E-07	1254698,5
9	8,5	9,5	1	2,00E+10	3	1,0266E-06	974112,259
10	9,5	10,5	1	2,00E+10	3	1,2526E-06	798347,914
11	10,5	11,5	1	2,00E+10	3	1,4531E-06	688206,842
12	11,5	12,5	1	2,00E+10	3	1,9232E-06	519972,31
13	12,5	13,5	1	2,00E+10	3	2,2753E-06	439497,769
14	13,5	14	0,5	2,00E+10	3	2,8836E-06	173391,624

c. Perhitungan periode Gelombang

Daerah operasional dari tanker tentunya harus diketahui terlebih dahulu, dimana hal tersebut termasuk dalam data lingkungan. Data ini digunakan untuk menganalisa struktur tersebut, baik dari segi kelayakan, kekuatan, keandalan untuk beroperasi, maupun umur konstruksi di lingkungan tertentu. Berdasarkan jurnal STTAL pada tahun 2016, maka dihasilkan data gelombang air laut sebagai berikut.

no.	Lokasi	Musom Barat		Musom Timur	
		Lm	Hs	Lm	Hs
1	Laut Jawa	120	3	120	2,5
2	Laut Arafuru	210	3,5	120	3
3	Selat Karimata	210	3,5	120	1,5
4	Selat Makassar	270	2	210	1,5
5	Perairan Selatan Jawa	360	4	450	6

Karena Kapal Tanker 17500 beroperasi disekitar perairan Laut Jawa, maka nilai yang diambil

$$T_w = \sqrt{\frac{2\pi L_w}{g}} \quad \text{-----} \quad T_e = \frac{L_w}{V_w - V \cos \mu}$$

T_w 8,7669 s 1 Year= 31536000 s
 V_w 13,6878 m/s²
 T_e 5,58976 s

Dengan demikian maka dapat dilaksanakan Perhitungan Fatigue sebagai berikut

a. Perhitungan Umur Konstruksi dengan kedalaman awal 0.5 mm

[illegible]

b. Perhitungan Umur Konstruksi dengan kedalaman awal 1.5 mm

[illegible]

c. Perhitungan Umur Konstruksi dengan kedalaman awal 2.5 mm

[illegible]

BIODATA PENULIS



Erlangga Fandra Zandi, itulah nama lengkap penulis. Dilahirkan di Surabaya pada 1 Mei 1994 silam, Penulis merupakan anak pertama dalam keluarga. Penulis menempuh pendidikan formal pada SDN Kandangan III Surabaya, kemudian melanjutkan di SMPN Negeri 1 Surabaya dan SMAN Negeri 5 Surabaya. Setelah lulus SMA, Penulis diterima di Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS pada tahun 2009 melalui jalur SNMPTN tulis.

Di Departemen Teknik Perkapalan, Penulis mengambil Bidang Studi Rekayasa Perkapalan – Konstruksi Kapal. Selama masa studi di ITS, Penulis aktif mengikuti organisasi kemahasiswaan. Penulis menjadi *staff* Departemen HIMATEKPAL ITS 2012/2015 serta *staff* SAMPAN 8 dan 9 pada periode 2013/2014. Selain itu, Penulis juga pernah menjadi peserta PKM Tingkat ITS dan beberapa penulisan ilmiah yang lain.

Email: erlangga12@mhs.na.its.ac.id/ardi.naval@gmail.com